

Strategien für eine naturverträgliche Energiewende

Analyse von Strategien zur Umsetzung von
ambitioniertem Klimaschutz unter Gewähr-
leistung eines hohen Naturschutzniveaus

Sascha Samadi

Georg Kobiela

Stefan Lechtenböhmer

Henning Wilts

Auftraggeber:



Dieser Projektbericht ist Ergebnis des Projekts „Metastudie vorliegender Energieszenarien für Deutschland mit dem Fokus auf Optionen für eine naturverträgliche Energiewende“, das vom Wuppertal Institut im Auftrag des Naturschutzbund Deutschland e. V. (NABU) durchgeführt wurde. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Projektlaufzeit: März 2018 – Dezember 2018

Impressum

Herausgeber:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Ansprechpartner:

Dr. Sascha Samadi
Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen
sascha.samadi@wupperinst.org
Tel. +49 202 2492-107
Fax +49 202 2492-198

Stand:

Dezember 2018

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
1 Einleitung	6
2 Metaanalyse deutscher Energie- und Klimaschutzszenarien	8
2.1 Auswahl und Kurzbeschreibung der analysierten Szenarien	8
2.2 Gegenüberstellung der Szenarien nach zentralen Klimaschutzstrategien für das Energiesystem	12
2.2.1 <i>Energieeffizienzverbesserungen</i>	14
2.2.2 <i>Verhaltensänderungen</i>	16
2.2.3 <i>Elektrifizierung</i>	18
2.2.4 <i>Nutzung erneuerbarer Energien</i>	19
2.2.5 <i>Import CO₂-freier Energieträger</i>	21
2.2.6 <i>Nutzung von CCS an Industrieanlagen</i>	23
2.3 Wesentliche Erkenntnisse aus der Szenario-Metaanalyse	24
3 Darstellung und Diskussion potenziell naturverträglicher Klimaschutzstrategien	27
3.1 Stärkere Nutzung von Fotovoltaik anstatt von Windenergie	27
3.2 Stärkere Nutzung anderer erneuerbarer Energien anstatt von Biomasse	35
3.3 Deutliche Erhöhung der Energieeffizienz	37
3.4 Verbreitung von suffizienteren Lebensstilen	39
3.5 Import von erneuerbar erzeugtem Strom und/oder auf dessen Basis erzeugten synthetischen Energieträgern	44
3.6 Einsatz von CCS im Industriesektor zur Reduktion des Strombedarfs	48
3.7 Förderung natürlicher Senken	50
3.8 Kreislaufwirtschaft und Materials substitution	55
4 Fazit und Schlussfolgerungen	58
5 Literaturverzeichnis	64
6 Anhang	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über wichtige, seit 2015 veröffentlichte Studien mit Energie- bzw. Klimaschutzszenarien für Deutschland -----	9
Tabelle 2:	Übersicht über die fünf für die folgende Metaanalyse ausgewählten Energieszenarien -----	11
Tabelle 3:	Übersicht über die unterschiedlichen zentralen Klimaschutzstrategien-----	13
Tabelle 4:	Angenommene Verhaltens- bzw. Lebensstiländerungen in den betrachteten Szenarien (Quantifizierungen beziehen sich auf 2050 gegenüber jeweiliger Referenzentwicklung)-----	16
Tabelle 5:	Anteile der direkten und indirekten Stromnutzung in den verschiedenen Sektoren in den Jahren 1990 und 2017 sowie den betrachteten Szenarien zufolge im Jahr 2050 -----	19
Tabelle 6:	Durchschnittlicher jährlicher Anstieg der Erneuerbaren-Stromerzeugung zwischen 2000 und 2017 sowie den betrachteten Szenarien zufolge zwischen 2017 und 2050 (in TWh/a) -----	21
Tabelle 7:	Endenergetische Nutzung erneuerbarer Energien für die Wärmebereitstellung und im Verkehr im Jahr 2017 sowie den betrachteten Szenarien zufolge im Jahr 2050 (in PJ) -----	21
Tabelle 8:	Übersicht über die unterschiedliche Nutzung zentraler Klimaschutzstrategien bis zum Jahr 2050 in den fünf analysierten Szenarien -----	24
Tabelle 9:	Abschätzung der Onshore-Windenergieanlagen, auf die im Jahr 2050 bei einem starken Fokus auf den PV-Ausbau verzichtet werden könnte-----	35
Tabelle 10:	In der Literatur als (maximal) realistisch eingeschätztes CO ₂ -Minderungspotenzial verschiedener Suffizienzstrategien bis zum Jahr 2030 -----	42
Tabelle 11:	Stromeinsparpotenzial im Jahr 2050 in der Stahl- und Zementindustrie durch einen breiten CCS-Einsatz (gegenüber Dekarbonisierung über Elektrifizierung und H ₂ -Einsatz) -----	49
Tabelle 12:	THG-Reduktionspotenziale bei der Umwandlung von Ackerland auf organischen Böden hin zu Wald, Feuchtgebieten oder Gehölzen und bei der Produktion von Bioenergie -----	52
Tabelle 13:	Kriterien-basierter Vergleich (als vorläufig zu betrachten) der in dieser Studie identifizierten potenziell naturverträglichen Klimaschutzstrategien -----	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Durchschnittliche jährliche Steigerung der Endenergieproduktivität in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2016 sowie in den betrachteten Szenarien zwischen 2010 und 2050 -----	15
Abbildung 2: Anteile von Strom und aus Strom gewonnenen Energieträgern am gesamten Endenergieverbrauch im Jahr 2017 und den betrachteten Szenarien zufolge im Jahr 2050 -----	18
Abbildung 3: Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in den Jahren 2000 und 2017 sowie den betrachteten Szenarien zufolge in den Jahren 2030 und 2050 (in TWh) -----	20
Abbildung 4: Nettoimport von Strom und synthetischen Energieträgern im Jahr 2017 sowie den betrachteten Szenarien zufolge in den Jahren 2030 und 2050 (in PJ)-----	22
Abbildung 5: Installierte Kapazität (in MW) und Anlagenzahl von Onshore-Windenergieanlagen nach Szenarien bei einer angenommenen durchschnittlichen Nennleistung von 3 MW/Anlage im Jahr 2030 und 5 MW/Anlage im Jahr 2050 -----	29
Abbildung 6: Verhältnis zwischen Windstromerzeugung und PV-Stromerzeugung im Jahr 2000 sowie in den Jahren 2030 und 2050 nach den in Kapitel 2 betrachteten Szenarien -----	31

1 Einleitung

Deutschland hat sich weitreichende Ziele für den Umbau seines Energiesystems bis Mitte des Jahrhunderts gesetzt. Insbesondere wird eine deutliche Minderung des Energieverbrauchs und eine Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch auf 60 % angestrebt. Die „Energiewende“ soll wesentlich zur Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen bis Mitte des Jahrhunderts um 80 bis 95 % (gegenüber 1990) beitragen, und somit die internationalen Bemühungen zur Eindämmung des Klimawandels angemessen unterstützen. Damit spielt die Energiewende perspektivisch eine sehr große Rolle dabei, die Überlebensfähigkeit der natürlichen Ökosysteme in Deutschland und weltweit zu sichern, die – wie anhand der Studienlage immer deutlicher wird – mit der stattfindenden globalen Erwärmung in bedeutendem Maße gefährdet sind. Neben dem Klimaschutz sind der Kernenergieausstieg (bis Ende des Jahres 2022) sowie die Wahrung der Wettbewerbsfähigkeit und Versorgungssicherheit weitere übergeordnete Ziele, die laut Bundesregierung mit der Energiewende verfolgt werden (BMWi 2018).

Am weitesten vorangeschritten ist die Energiewende bisher im Bereich der Stromerzeugung. Hier konnte der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch zwischen den Jahren 2000 und 2017 von 6,5 % auf 36,4 % erhöht werden (AG Energiebilanzen 2018a). Ausschlaggebend hierfür war insbesondere ein starker Zubau von Windenergieanlagen an Land und in den letzten Jahren auch auf dem Meer sowie der Aufbau großer Kapazitäten an Biomasse- und Fotovoltaik-Anlagen. Deutlich weniger Fortschritte hat es in der Vergangenheit hingegen bei der Transformation des Verkehrs und des Wärmemarktes sowie allgemein bei der Reduzierung des Energieverbrauchs gegeben (Löschel et al. 2018).

Mit der fortschreitenden Transformation der Stromerzeugung gingen und gehen verschiedene gesellschaftliche Diskussionen einher. Der Fokus der öffentlichen Diskussion liegt dabei häufig auf den Kosten der Transformation und der gesellschaftlichen Verteilung dieser Kosten. Auch Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz werden insbesondere bezüglich des Windenergieausbaus sowie auch in Hinblick auf den damit zu einem großen Teil in Verbindung stehenden Ausbaubedarf des Stromübertragungsnetzes diskutiert.

Zwar gibt es einen Zusammenhang zwischen gesellschaftlicher Akzeptanz und Naturverträglichkeit von Energiewende-Maßnahmen, dennoch werden die Einflüsse von Energiewendemaßnahmen auf die Natur in der breiten Öffentlichkeit nur am Rande explizit wahrgenommen und diskutiert.¹ Spiegelbildlich scheinen sich auch die energiepolitischen Diskussionen vor allem um Kostensenkungspotenziale, Verteilungsfragen, regionale bzw. sektorale Betroffenheit und potenzielle (oft finanzielle) Maßnahmen zur Steigerung der Akzeptanz von Anlagen- und Infrastrukturausbau zu drehen.

¹ Eine aktuelle Ausnahme stellen zwei kürzlich veröffentlichte Studien im Auftrag des WWF dar, die wichtige Aspekte der Naturverträglichkeit der Energiewende untersuchen. Eine der Studien betrachtet die erwartete zukünftige Flächeninanspruchnahme durch den Ausbau erneuerbarer Energien (Matthes et al. 2018), während die andere Studie (Dijks et al. 2018) regionale Auswirkungen des Windenergieausbaus auf die Vogelwelt untersucht. Auch im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) wurden in den vergangenen Jahren Studien durchgeführt, die das Spannungsverhältnis zwischen Naturschutz und Energiewende thematisieren und naturschutzgerechte Lösungen aufzeigen wollen (z. B. Walter et al. 2018, Demuth et al. 2016).

Aufgrund der perspektivisch insbesondere mit dem benötigten weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien verbundenen weiter zunehmenden Auswirkungen der Energiesystemtransformation auf Landschaft und Ökosysteme erscheint es angemessen, dass Politik und Gesellschaft die Naturverträglichkeit der Energiewende bzw. ihrer konkreten Ausgestaltung stärker in den Blick nehmen als bisher. Denn eine angemessene Berücksichtigung und darauf aufbauende weitest mögliche Minderung der negativen Einflüsse von Energiewende-Maßnahmen auf die Natur ist aus verschiedenen Gründen von Bedeutung: Zum einen ist die gesellschaftliche Akzeptanz für das Gelingen der Energiewende entscheidend und eine weitgehend naturverträgliche Ausgestaltung der Energiewende kann diese Akzeptanz befördern. Zum anderen sind intakte Ökosysteme für das menschliche Wohlergehen von hoher Bedeutung und es kann darüberhinaus argumentiert werden, dass ihnen unabhängig vom Wert für den Menschen auch ein intrinsischer Wert zugesprochen werden sollte. (Zusätzliche) Ökosystemstörungen sollten folglich so weit wie möglich vermieden werden.

Vor diesem Hintergrund hat der NABU das Wuppertal Institut beauftragt, in dem vorliegenden Bericht mögliche Maßnahmen zu identifizieren und zu beschreiben, die sowohl wesentliche Beiträge zur Erreichung der Ziele der Energiewende leisten können, deren Umsetzung gleichzeitig aber nach derzeitigem Wissensstand keine oder nur geringe negative Auswirkungen auf die Natur hätte. Der Bericht soll dabei helfen, die Aufmerksamkeit auf gegenwärtig nicht ausgeschöpfte, von der Energiepolitik und auch von vielen vorliegenden Energiewende-Studien nicht oder wenig beachtete aber wahrscheinlich naturschutzgerechtere Klimaschutzoptionen zu richten und diese Optionen besser zu verstehen.

Hierfür wird zunächst im folgenden Kapitel 2 eine Metaanalyse vorliegender Energieszenarien für Deutschland durchgeführt. Diese Analyse zeigt auf, welche unterschiedlichen Vorstellungen es über den möglichen Weg hin zu einem klimafreundlichen zukünftigen Energiesystem gibt und wie stark und aus welchen Gründen sich vorliegende Szenarien hinsichtlich ihres Rückgriffs auf verschiedene, naturschutzfachlich unterschiedlich einzuschätzende Klimaschutzoptionen unterscheiden. Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen sowie auf Grundlage einer zusätzlichen Literaturrecherche werden anschließend in Kapitel 3 verschiedene potenziell naturverträgliche Klimaschutzoptionen identifiziert und es wird diskutiert, inwieweit und unter welchen Voraussetzungen diese Optionen zukünftig wesentlich zum Gelingen der deutschen Energiewende bzw. zur Einsparung von THG-Emissionen beitragen können. In dem abschließenden Fazit in Kapitel 4 werden die Erkenntnisse der Studie zusammengefasst und es erfolgt eine Gegenüberstellung der diskutierten Maßnahmen in Form einer vorläufigen Einschätzung ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile nach verschiedenen Kriterien.

2 Metaanalyse deutscher Energie- und Klimaschutzszenarien

In diesem Kapitel werden ausgewählte vorliegende Energie- und Klimaschutzszenarien für Deutschland bezüglich wesentlicher Klimaschutzstrategien einander gegenübergestellt. Diese Metaanalyse dient zum einen dazu, einen Überblick über unterschiedliche Strategien zu gewinnen, die bis Mitte des Jahrhunderts in bedeutendem Maße zum Erreichen der langfristigen Klimaschutzziele beitragen können. Zum anderen soll verdeutlicht werden, inwiefern sich die Klimaschutzstrategien von Szenario zu Szenario unterscheiden und ob es beispielsweise bezüglich des Einsatzes der verschiedenen Strategien systematische Unterschiede zwischen Szenarien mit unterschiedlich ambitionierten Treibhausgasminderungszielen gibt. Die Metaanalyse verschafft gleichzeitig einen Überblick über den derzeitigen politisch-wissenschaftlichen „Mainstream“ hinsichtlich wahrscheinlicher oder wünschenswerter Klimaschutzstrategien. Diese Erkenntnisse werden in den Kapiteln 3 und 4 genutzt, um zu diskutieren, ob bestimmte potenziell naturverträgliche Klimaschutzstrategien bisher in der gesellschaftlichen Diskussion um die Energiewende nur unzureichend Beachtung finden.

Zu diesem Zweck wird in Abschnitt 2.1 zunächst dargestellt, welche der vielen vorliegenden Energie- und Klimaschutzszenarien aus welchen Gründen für die anschließende Metaanalyse berücksichtigt wurden. In Abschnitt 2.2 erfolgt die Metaanalyse der ausgewählten Szenarien entlang einer Darstellung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Szenarien in Hinblick auf deren Verfolgung verschiedener zentraler Klimaschutzstrategien. Abschließend werden in Abschnitt 2.3 die wesentlichen Erkenntnisse aus der Metaanalyse zusammengefasst.

2.1 Auswahl und Kurzbeschreibung der analysierten Szenarien

Szenarien möglicher zukünftiger Entwicklungen des Energiesystems und der Treibhausgasemissionen spielen weltweit eine wichtige Rolle bei der Beratung energiepolitischer Entscheidungsträger. In Deutschland gibt es eine lange, mehrere Jahrzehnte zurückreichende Tradition der Erstellung entsprechender Energieszenarien (Dieckhoff 2015). Diese Szenarien wurden und werden i. d. R. entweder von staatlichen Stellen (z. B. Bundesministerien) in Auftrag gegeben bzw. durchgeführt, um unterstützendes „Zukunftswissen“ für energiepolitische Entscheidungen zu erhalten, oder aber von Umweltverbänden, Industrieverbänden oder Unternehmen initiiert, um die prinzipielle Machbarkeit bestimmter Entwicklungen aufzuzeigen und auf diese Weise energiepolitische Entscheidungen in jeweiligem Sinne zu beeinflussen.

Tabelle 1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** liefert einen Überblick über wichtige, seit 2015 veröffentlichte Studien, die langfristige Energie- und Klimaschutzszenarien für Deutschland entwickelt haben. Die Studien unterscheiden sich u. a. hinsichtlich ihrer Zielsetzungen, ihrer methodischen Vorgehensweisen, ihrer betrachteten Systemausschnitte und ihrer quantitativen Detailtiefe. Die meisten der Studien enthalten mehrere Energie- bzw. Klimaschutzszenarien, die sich häufig bezüglich ihres Klimaschutzambitionsniveaus unterscheiden. Teilweise werden in den Studien zusätzlich so genannten „Referenzszenarien“ bzw. „Business-as-usual“-Szenarien erstellt, die verdeutlichen sollen, wie sich das Energiesystem und die Treibhausgasemissionen entwickeln könnten, wenn zukünftig keine zusätzlichen Klimaschutzmaßnahmen ergriffen würden.

Tabelle 1: Übersicht über wichtige, seit 2015 veröffentlichte Studien mit Energie- bzw. Klimaschutzszenarien für Deutschland

Titel der Studie	Auftraggeber(in)	Bearbeiter(in)	Erscheinungsjahr
dena-Leitstudie Integrierte Energiewende	Deutsche Energie-Agentur (dena)	ewi Energy Research & Scenarios (ewi ER&S)	2018
Klimapfade für Deutschland	Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI)	Gerbert et al.	2018
Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten	-	Umweltbundesamt (UBA)	2017
Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)	Fraunhofer ISI et al.	2017
Erfolgreiche Energiewende nur mit verbesserter Energieeffizienz und einem klimagerechten Energiemarkt – Aktuelle Szenarien 2017 der deutschen Energieversorgung	-	J. Nitsch	2017
Klimaschutz durch Sektorenkopplung: Optionen, Szenarien, Kosten	Deutsche Erdöl AG (DEA) et al.	J. Ecke et al.	2017
Sektorkopplung durch die Energiewende – Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zu Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung	-	V. Quaschnig	2016
Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)	J. Repenning et al.	2015
Was kostet die Energiewende? – Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050	-	Fraunhofer ISE	2015
Klimaschutz: Der Plan – Energiekonzept für Deutschland	Greenpeace	BET, Hamburg Institut	2015
Grundlagen und Konzepte einer Energiewende 2050	-	Bund für Umwelt- und Naturschutz (BUND)	2015

Aus den in Tabelle 1 aufgeführten Studien wurden für die Metaanalyse im Rahmen dieses Projektes fünf Szenarien ausgewählt. Durch diese Begrenzung auf fünf Szenarien soll eine ausreichende Detailtiefe der Analyse ermöglicht und eine ausreichende Übersichtlichkeit gewährleistet werden. Die Auswahl der Szenarien fand in Abstimmung mit dem Auftraggeber statt und orientierte sich an den folgenden Kriterien:

- **Aktualität:** Die Szenarien sollten nicht vor dem Jahr 2015 erschienen sein.
- **Mindest-Ambitionsniveau beim Klimaschutz:** Die Szenarien sollten gegenüber 1990 eine Minderung der deutschen THG-Emissionen um mindestens 80 % bis 2050 beschreiben.
- **Detailltiefe:** Die Szenarien sollten sowohl auf der Nachfrage- als auch auf der Angebotsseite des Energiesystems eine hohe quantitative Detailltiefe besitzen, um im Rahmen der Metaanalyse eine ausreichend detaillierte Gegenüberstellung der Szenarien zu ermöglichen.

Da Tabelle 1 nur Studien ausweist, die seit 2015 erschienen sind, ist das Kriterium der Aktualität für alle diese Studien erfüllt. Das Kriterium des Mindest-Ambitionsniveaus beim Klimaschutz bedeutet, dass keine Referenzszenarien der Studien für die weitere Analyse berücksichtigt wurden. Die Klimaschutzszenarien der verschiedenen Studien erfüllen hingegen dieses Kriterium, da sie sich stets an dem bestehenden THG-Minderungsziel der Bundesregierung für das Jahr 2050 orientieren (80 bis 95 % Minderung gegenüber 1990). Aufgrund einer für die im Folgenden vorgesehene Metaanalyse als unzureichend eingeschätzten Detailltiefe sind allerdings die Klimaschutzszenarien von einigen der in Tabelle 1 genannten Studien (Ecke et al. 2017, Quaschnig 2016, Fraunhofer ISE 2015, BET/Hamburg Institut 2015, BUND 2015) nicht für die Auswahl der Metaanalyse berücksichtigt worden.

Bezüglich der Vorgabe eines Mindest-Ambitionsniveaus beim Klimaschutz soll an dieser Stelle betont werden, dass eine Minderung der THG-Emissionen um lediglich 80 % bis 2050 nicht als angemessener Beitrag Deutschlands zur Realisierung der Ziele des Pariser Abkommens angesehen werden kann. Vielmehr erscheint hierfür eine Emissionsminderung um mindestens 95 % angemessen, denn nach Rogelj et al. (2015) erfordert die Begrenzung der Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C einen Rückgang der globalen THG-Emissionen auf Null zwischen etwa 2050 und 2065. Nach du Pont et al. (2017) müssen die THG-Emissionen der EU im Jahr 2050 bei einer fairen globalen Verteilung der verbleibenden Emissionen für eine Begrenzung der Erwärmung auf 2 °C rund 88 % niedriger liegen als 1990 und für eine Begrenzung auf 1,5 °C bereits 2050 negativ sein (negative Emissionen ließen sich z. B. durch die Kombination von Biomassenutzung und CCS erreichen). Dennoch werden in der folgenden Metaanalyse auch zwei Szenarien mit einer THG-Minderung von „nur“ 80 % bis 2050 betrachtet, denn das untere Ende der nach wie vor bestehenden Zielsetzung der Bundesregierung hat weiterhin bedeutenden Einfluss auf die politischen und wissenschaftlichen Diskussionen zur Transformation des deutschen Energiesystems. Eine Gegenüberstellung von -80 %-Szenarien und -95 %-Szenarien ermöglicht zudem eine Verdeutlichung der zusätzlich benötigten Schritte, um von einer Minderung um 80 % zu einer Minderung um 95 % zu kommen.

Da die oberste in Tabelle 1 aufgeführte Studie (ewi ER&S 2018) erst nach der Wahl der Szenarien und dem Beginn der Metaanalyse erschienen ist, konnten die Szenarien dieser Studie in der Metaanalyse nicht berücksichtigt werden. Die Studie von Fraunhofer ISI et al. (2017) lag bis zum Zeitpunkt des Beginns der Metaanalyse lediglich in vorläufiger Form vor, insbesondere stand noch die Entwicklung eines ambitionierten Klimaschutzszenarios mit einer Minderung der THG-Emissionen um 95 % bis 2050 aus. Da eine entsprechend weitgehende Minderung aus den oben ge-

nannten Gründen angemessen erscheint, wurde entschieden, Szenarien mit THG-Minderungen von „nur“ 80 % nur dann in die Metaanalyse aufzunehmen, wenn aus einer bestimmten Studie gleichzeitig auch ein ambitionierteres Szenario betrachtet werden kann, um somit eine möglichst gute Vergleichbarkeit sehr ambitionierter Szenarien mit weniger ambitionierten Szenarien zu ermöglichen.

Damit verbleiben die Klimaschutzszenarien aus vier Studien (Gerbert et al. 2018, UBA 2017, Nitsch 2017, Repenning et al. 2015), die grundsätzlich für die anstehende Metaanalyse in Frage kommen. Bezüglich der abschließenden Auswahl von fünf Szenarien wurde der wahrgenommene Einfluss der jeweiligen Studien auf die energiepolitischen Diskussionen in Politik, Gesellschaft und Wissenschaft berücksichtigt. Die Studie im Auftrag des BDI (Gerbert et al. 2018) wurde nach ihrer Veröffentlichung in Deutschland und teilweise auch auf europäischer Ebene intensiv diskutiert. Die Szenarien im Auftrag des Bundesumweltministeriums (Repenning et al. 2015) wurden hingegen in den Jahren 2015 und 2016 – unter anderem im Rahmen der Stakeholder-Beteiligung – in starkem Maße für die Vorbereitung des Klimaschutzplan 2050 (BMUB 2016) genutzt. Bei der Szenariostudie des UBA (2017) handelt es sich schließlich um eine Überarbeitung einer insbesondere in der Wissenschaft viel beachteten und diskutierten Szenariostudie aus dem Jahr 2014 (UBA 2014). Die folgende Tabelle 2 fasst die fünf für die Metaanalyse ausgewählten Szenarien aus diesen drei Studien zusammen.

Tabelle 2: Übersicht über die fünf für die folgende Metaanalyse ausgewählten Energieszenarien

Titel der Studie	Ausgewählte(s) Szenario bzw. Szenarien aus der Studie	Änderung der gesamten THG-Emissionen zwischen 1990 und 2050	Änderung der energiebedingten THG-Emissionen zwischen 1990 und 2050
Klimapfade für Deutschland	80 %-Pfad	80 %	84 %
	95 %-Pfad	95 %	100 %
Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten	GreenEe	95 %	100 %
Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht	KS 80	80 %	85 %
	KS 95	95 %	97 %

Im Folgenden werden diese drei Studien und ihre Szenarien jeweils kurz vorgestellt:

Die Studie „Klimapfade für Deutschland“ (Gerbert et al. 2018) wurde vom Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) in Auftrag gegeben und im Januar 2018 veröffentlicht. Die Studie hat große Aufmerksamkeit erfahren, nicht zuletzt weil der BDI sich mit dieser Studie erstmals detailliert mit zukünftigen Klimaschutzpfaden auseinandersetzt und dabei die grundsätzliche Realisierbarkeit auch sehr ambitionierter THG-Minderungen einräumt. Die Studie ist von der Boston Consulting Group (BCG)

und Prognos in enger Abstimmung mit dem BDI und rund 70 seiner Mitgliedsunternehmen entstanden. Neben einem Referenzszenario werden zwei Klimaschutzszenarien beschrieben, die darstellen, wie Deutschland seine THG-Emissionen gegenüber 1990 um 80 % („80 %-Pfad“) bzw. 95 % („95 %-Pfad“) mindern könnte. Ein Schwerpunkt der Studie liegt auf der Analyse der ökonomischen Effekte der Szenarien, d. h. der erwarteten Auswirkungen z. B. auf die Energiesystemkosten, die zusätzlichen Investitionen sowie die einhergehenden Chancen und Herausforderungen für die deutsche Industrie. Der 80 %-Pfad wird in der Studie als „technisch möglich“ und „volkswirtschaftlich verkraftbar“ bezeichnet, während bezüglich des 95 %-Pfads festgehalten wird, dass dieser „an der Grenze absehbarer technischer Machbarkeit und heutiger gesellschaftlicher Akzeptanz“ läge. In der folgenden Metaanalyse werden beide Klimaschutzszenarien der Studie betrachtet, also sowohl der 80 %-Pfad als auch der 95 %-Pfad.

Die Studie „Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten“ wurde vom Umweltbundesamt (UBA) erarbeitet und im Oktober 2017 veröffentlicht. Die Studie beschreibt ein Szenario „GreenEe“, in dem bis zum Jahr 2050 eine Minderung der THG-Emissionen um 95 % erreicht wird. Im Gegensatz zu den anderen beiden in der folgenden Metaanalyse berücksichtigten -95 %-Szenarien (95 %-Pfad und KS 95) wird im Szenario GreenEe kein Einsatz von CCS im Industriesektor unterstellt. Stattdessen wird angenommen, dass sich bis 2050 so genannte „Breakthrough“-Technologien in verschiedenen Industriesektoren durchsetzen werden, z. B. die gasbasierte Direktreduktion bei der Primärstahlerzeugung oder die Nutzung inerter Anoden in der Primäraluminiumerzeugung. Ein Schwerpunkt der Studie liegt dabei auf der Berücksichtigung der mit Klimaschutzmaßnahmen einhergehenden Implikationen für den Ressourcenbedarf. Das UBA kommt dabei zu dem Ergebnis, „dass ein verbundener Klima- und Ressourcenschutz hilft, beide Ziele zu erreichen“ und folglich eine entsprechende systemische Vorgehensweise „künftig stärker politisch diskutiert und realisiert werden“ sollte.

Die Studie „Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) beauftragt und von Öko-Institut und Fraunhofer ISI erarbeitet. Neben einem Referenzszenario werden mit dem „Klimaschutzszenario 80“ („KS 80“) und dem Klimaschutzszenario 95“ („KS 95“) zwei Klimaschutzszenarien dargestellt, die bis Mitte des Jahrhunderts eine Minderung der THG-Emissionen Deutschlands um 80 bzw. 95 % beschreiben. Sowohl die Energienachfrage- als auch die Energieangebotsseite werden ebenso wie die nicht-energetischen Emissionsquellen detailliert modelliert und dargestellt. Die Studie möchte deutlich machen, welche Maßnahmen und Strategien notwendig sind, um die langfristigen Klimaziele der Bundesregierung erreichen zu können und diskutiert ebenfalls die Kosten und Nutzen entsprechender Maßnahme und Strategien für Verbraucherinnen und Verbraucher sowie die Volkswirtschaft.

2.2 Gegenüberstellung der Szenarien nach zentralen Klimaschutzstrategien für das Energiesystem

Die fünf im vorherigen Abschnitt ausgewählten Energieszenarien werden in diesem Abschnitt einander gegenübergestellt. Dabei erfolgt diese Gegenüberstellung entlang zentraler Klimaschutzstrategien für die Transformation des Energiesystems, d. h.

entlang von Strategien, die in den verschiedenen Szenarien (bzw. zumindest in einigen von ihnen) bis Mitte des Jahrhunderts in bedeutendem Umfang zur Reduktion der energiebedingten THG-Emissionen beitragen. Diese zentralen Klimaschutzstrategien werden in Tabelle 3 aufgeführt. Es werden sechs zentrale Strategien unterschieden, jeweils drei auf der Nachfrage- und Angebotsseite. Einige der Strategien werden zudem in unterschiedliche Dimensionen untergliedert.

Tabelle 3: Übersicht über die unterschiedlichen zentralen Klimaschutzstrategien

NACHFRAGESEITE	• Energieeffizienzverbesserungen
	• Verhaltensänderungen
	• Elektrifizierung
	○ Direkte Elektrifizierung
	○ Indirekte Elektrifizierung („Power-to-X“)
ANGEBOTSSEITE	• Nutzung erneuerbarer Energien
	○ Erneuerbare Energien für die Stromerzeugung
	○ Erneuerbare Energien für Verkehr & Wärme
	• Import CO₂-freier Energieträger
	○ Strom
	○ Synthetische Energieträger
	• Nutzung von CCS an Industrieanlagen

Im Folgenden wird für die einzelnen Strategien dargestellt, welche Rolle sie jeweils in den verschiedenen ausgewählten Szenarien spielen. Dadurch soll zum einen ein allgemeines Verständnis der verschiedenen, in vorliegenden Klimaschutzszenarien hauptsächlich verfolgten Klimaschutzstrategien gewonnen werden. Zum anderen soll aufgezeigt werden, welche der Strategien in den Szenarien in ähnlicher Weise zum Einsatz kommen, und bei welchen Strategien es demgegenüber deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien gibt.

Dabei ist darauf hinzuweisen, dass in Tabelle 3 nur diejenigen Klimaschutzstrategien aufgeführt werden, die zum einen das Energiesystem adressieren, und zum anderen in aktuellen Energie- und Klimaschutzszenarien für Deutschland eine Rolle spielen. Die Förderung natürlicher Senken könnte beispielsweise zwar einen nicht unwesentlichen Klimaschutzbeitrag liefern, betrifft aber nicht (direkt) das Energiesystem. Ebenfalls könnte die Nutzung von CCS an Kraftwerken der öffentlichen Stromversorgung (anstatt nur im Industriesektor) – ähnlich wie eine fortgesetzte Nutzung der Atomenergie – prinzipiell ebenfalls bedeutenden Mengen an CO₂-Emissionen einsparen, wird in aktuellen Deutschland-Szenarien jedoch aufgrund der mangelnden öffentlichen Akzeptanz bzw. der geltenden Gesetzeslage nicht berücksichtigt. (So-

wohl in Hinblick auf CCS für Kraftwerke als auch auf die Atomenergienutzung bestehen darüber hinaus grundsätzliche Zweifel an der Nachhaltigkeit dieser Technologien.) Schließlich könnte auch noch argumentiert werden, dass Materialeffizienz bzw. Schritte zur Kreislaufwirtschaft eine wichtige Strategie darstellen können, um auf der Nachfrageseite den Energiebedarf signifikant zu reduzieren. Diese Strategie spielt in den betrachteten Szenarien jedoch keine oder nur eine untergeordnete Rolle und wird daher erst im nächsten Kapitel (Abschnitt 3.8) diskutiert.

2.2.1 Energieeffizienzverbesserungen

Alle betrachteten Szenarien betonen, dass deutliche Effizienzsteigerungen bei der Nutzung von Energie in den verschiedenen Sektoren (Verkehr, Industrie, Gewerbe, Haushalte) eine wichtige Voraussetzung darstellen, um die langfristigen Klimaschutzziele erreichen zu können. Energieeffizienzsteigerungen werden in den Szenarien beispielsweise im Verkehr durch einen verstärkten Einsatz von Elektromotoren, im Gebäudesektor durch eine forcierte energetische Sanierung von Altbauten und in der Industrie durch den Ersatz alter Pumpen und Motoren durch hocheffiziente neue Geräte erreicht. Aufgrund der Vielzahl an Technologien bzw. Anwendungen und einem unterschiedlichen Detailgrad und Aggregationsniveau der untersuchten Szenarien ist eine präzise Darstellung und Gegenüberstellung der Effizienzverbesserungen in den einzelnen Szenarien nicht möglich.

Aus allen Szenarien lässt sich aber die jeweils angenommene Entwicklung der Endenergieproduktivität ablesen. Diese kann als ein (stark aggregierter) Indikator für die Entwicklung der Energieeffizienz angesehen werden. Die Endenergieproduktivität stellt dar, welcher volkswirtschaftliche Output (gemessen als Bruttoinlandsprodukt) pro eingesetzte Einheit Endenergie erzeugt werden kann. In Deutschland ist die Endenergieproduktivität in der Vergangenheit kontinuierlich angestiegen, was sowohl auf „autonome“ (d. h. durch den allgemeinen technischen Fortschritt zurückzuführende) als auch auf regulatorisch angereizte Energieeffizienzverbesserungen zurückgeführt werden kann. Aber auch strukturelle Veränderungen der Volkswirtschaft (z. B. Rückgang der Bedeutung der Industrie bzw. speziell der energieintensiven Industrie) haben in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten zu der Steigerung der Endenergieproduktivität beigetragen.

Wie Abbildung 1 zeigt, ist die Endenergieproduktivität in Deutschland zwischen 2000 und 2016 um durchschnittlich 1,3 % pro Jahr gestiegen. In den untersuchten Szenarien wird für den Zeitraum 2010 bis 2050 hingegen ein deutlich stärkerer durchschnittlicher jährlicher Anstieg unterstellt, der zwischen 2,1 und 2,7 % liegt. Dieser Unterschied verdeutlicht zum einen die große Bedeutung, die einer forcierten Steigerung der Energieeffizienz in den Szenarien beigemessen wird und legt zum anderen nahe, dass die gegenwärtigen energiepolitischen Rahmenbedingungen und Fördermaßnahmen für Energieeffizienz unzureichend sind.

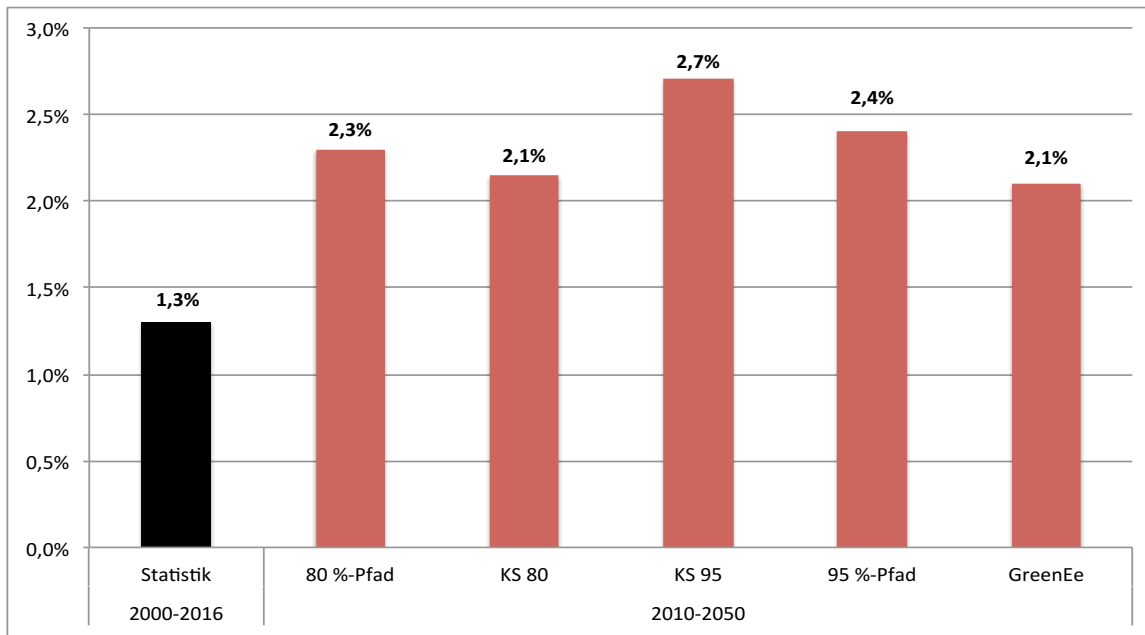


Abbildung 1: Durchschnittliche jährliche Steigerung der Endenergieproduktivität in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2016 sowie in den betrachteten Szenarien zwischen 2010 und 2050

Quellen: Angegebene Szenarien sowie AG Energiebilanzen (2018b) und Statistisches Bundesamt (2018a) für den Statistik-Wert.

Ein bedeutender Grund für die höheren Steigerungsraten der Endenergieproduktivität in den Szenarien liegt an den in allen Szenarien angenommenen deutlichen Zuwachs der Elektromobilität im Verkehrssektor. Elektromotoren sind wesentlich energieeffizienter als Verbrennungsmotoren und der weitreichende Ersatz letzter durch erstere führt folglich zu einem starken Rückgang des Endenergiebedarfs im Verkehr. Eine überschlägige Rechnung zeigt, dass auf diesen Effekt der Elektrifizierung des Verkehrs je nach Szenario etwa 0,2 bis 0,5 Prozentpunkte der durchschnittlichen jährlichen Steigerung der Endenergieproduktivität zurückzuführen sind. Dies bedeutet jedoch gleichzeitig, dass sich auch ohne diesen „Sondereffekt“ die Endenergieproduktivität in den Szenarien stärker steigert (dann – je nach Szenario – um 1,7 bis 2,2 %) als in der Vergangenheit zu beobachten war.

Ein wichtiger Grund hierfür sind die Annahmen zur zukünftigen energetischen Sanierungsrate im Gebäudesektor. Die energetische Sanierungsrate – ein aggregierter Indikator für unterschiedliche energetische Sanierungsmaßnahmen am Gebäude – verharret seit Jahren bei rund 1 %, während die hier betrachteten Szenarien davon ausgehen, dass diese Rate im Schnitt der kommenden Jahrzehnte auf mindestens 1,7 bis 2,2 % (Szenarien „80 %-Pfad“, „95 %-Pfad“, „KS 80“) bzw. sogar auf 2,6 (Szenario „GreenEe“) bzw. 3,1 % (Szenario „KS 95“) gesteigert werden kann.² Aufgrund des hohen Anteils der Raumwärme am gesamten Endenergiebedarf in Deutschland kommt der energetischen Gebäudesanierung eine bedeutende Rolle bei der Senkung des Endenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen zu. Verbesserungen der Rahmenbedingungen für Gebäudesanierungen erscheinen vor dem Hintergrund als unerlässlich.

² Die Autoren des KS 95-Szenarios betonen jedoch, dass es „weiterer Untersuchungen“ bedarf, um die Frage zu beantworten, ob „die sich im KS 95 ergebenden Sanierungsraten durch die Industrie und das Handwerk abgebildet werden können.“

2.2.2 Verhaltensänderungen

Als Verhaltensänderungen werden an dieser Stelle Energie-einsparende bzw. THG-Emissionen-vermeidende Änderungen in den Verhaltensweisen bzw. Lebensstilen der Bevölkerung oder von Teilen der Bevölkerung definiert, die zumindest teilweise auf das Motiv „Klimaschutz“ zurückzuführen sind. Entsprechende Änderungen von Verhaltensweisen bzw. Lebensstilen können auch als „Suffizienz“ bezeichnet werden. Sie können sowohl durch einen Wertewandel bei Individuen bzw. gesellschaftlichen Gruppen als auch durch klimapolitische Maßnahmen (z. B. Verteuerung fossiler Energieträger oder Verbesserungen des ÖPNV) initiiert werden. Entsprechende Verhaltens- bzw. Lebensstiländerungen werden in den untersuchten Szenarien in unterschiedlichem Ausmaß angenommen, wie Tabelle 4 verdeutlicht.

Tabelle 4: Angenommene Verhaltens- bzw. Lebensstiländerungen in den betrachteten Szenarien (Quantifizierungen beziehen sich auf 2050 gegenüber jeweiliger Referenzentwicklung)

	80-Pfad (Gerbert et al. 2018)	KS 80 (Repenning et al. 2015)	KS 95 (Repenning et al. 2015)	95-Pfad (Gerbert et al. 2018)	GreenEe (UBA 2017)
Personenverkehr					
Vermeidung von Verkehrsleistung					Land: -15, Flug: -10
Verlagerung auf energieeffizientere Verkehrsmittel	MIV: -7	MIV: -9	MIV: -18	MIV: -7	MIV: ca. -13%
Einführung von Geschwindigkeitsbegrenzungen			Nicht näher angegeben		120 km/h (Autobahn) bzw. 80 km/h (Landstraße)
Höherer durchschnittlicher Pkw-Auslastungsgrad			+11%		ca. +10%
Andere Bereiche					
Reduktion der Raumtemperaturen im Winter			19 °C statt 20 °C		
Minderung des pro-Kopf-Fleischkonsums		Auf mittlere DGE-Empfehlung	Auf untere DGE-Empfehlung		Auf mittlere DGE-Empfehlung

Quellen: Angegebene Szenarien.

In allen Szenarien wird – gegenüber einer jeweils unterstellten Referenzentwicklung ohne Klimaschutzbemühungen – ein Rückgang der Verkehrsleistung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) angenommen. In drei der Szenarien („80-Pfad“, „KS 80“, „95-Pfad“) beträgt dieser Rückgang bis Mitte des Jahrhunderts 7 bis 9, in den zwei weiteren Szenarien „GreenEe“ und „KS 95“ sogar 13 bzw. 18. In den beiden Szenarien im Auftrag des BDI werden darüberhinaus keine weiteren Verhaltens- bzw.

Lebensstiländerungen unterstellt, die Studie weist diesbezüglich explizit auf eine „geringe gesellschaftliche Akzeptanz für Fleischverzicht [und] andere Suffizienzmaßnahmen“ hin. Im Szenario „KS 80“ wird als einziges weiteres Suffizienzelement hingegen angenommen, dass der durchschnittliche Pro-Kopf-Fleischkonsum in Deutschland bis zum Jahr 2050 von derzeit über 1.100 g (nach BVDF 2018) auf 450 g pro Woche sinkt, und damit den gegenwärtigen gesundheitsbezogenen Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE) entspricht. Durch eine solche Reduktion des Fleischkonsums könnten insbesondere die THG-Emissionen der Landwirtschaft reduziert werden.

Die umfassendsten Verhaltens- bzw. Lebensstiländerungen werden in den beiden ambitionierten Klimaschutzszenarien „KS 95“ und „GreenEe“ unterstellt. Neben der Reduktion des MIV wird auch in diesen beiden Szenarien eine Minderung des durchschnittlichen Pro-Kopf-Fleischkonsums angenommen, im Szenario „KS 95“ sogar auf nur 300 g pro Woche, den unteren Wert der derzeitigen DGE-Empfehlung. Zusätzlich werden in beiden Szenarien weitere Verhaltensänderungen im Personenverkehr angenommen, nämlich zum einen die Einführung neuer Tempolimits bzw. die Absenkung bestehender Tempolimits und zum anderen eine Erhöhung des durchschnittlichen Pkw-Auslastungsgrads um 10 bzw. 11 %. Im Szenario „GreenEe“ wird zudem neben der angenommenen *Verlagerung* von Teilen des Personenverkehrs auch ein *Rückgang* gegenüber einer Referenzentwicklung unterstellt, nämlich beim landbasierten Personenverkehr um 15 % und beim Flugverkehr um 10 %. Im Szenario „KS 95“ wird zudem unterstellt, dass die durchschnittliche Innenraumtemperatur im Winter von 20 °C auf 19 °C gesenkt wird, und dadurch Energie für die Raumwärmebereitstellung eingespart werden kann.

Nicht immer gehen die Studien darauf ein, wie genau bzw. mit welchen Maßnahmen die angenommenen Lebensstil- bzw. Verhaltensänderungen erreicht werden könnten. Repenning et al. (2015) schlagen „z. B. [...] steuerliche Maßnahmen“ vor, um energiesparendes Nutzerverhalten bei der Gebäudebeheizung anzuregen und halten eine Erhöhung des durchschnittlichen Pkw-Auslastungsgrads durch „veränderte Wahrnehmung der Umweltfolgen“ des MIV und/oder durch eine „Verteuerung des MIV“ grundsätzlich für realisierbar. Die Verlagerung des Personenverkehrs hin zu umweltfreundlicheren Verkehrsmitteln soll nach Repenning et al. (2015) zum einen durch eine „Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Verkehrs“ und zum anderen durch „höhere [...] Kosten für den MIV“ angeregt werden. Auch das UBA (2016, 2017) setzt im Szenario „GreenEe“ auf eine solche Kombination der Steigerung der Attraktivität des ÖPNV bei gleichzeitiger Verteuerung des MIV.

Grundsätzlich sind Verhaltens- und Lebensstiländerungen denkbar, die noch über die Annahmen in den Szenarien „KS 95“ und „GreenEe“ hinausgehen. Beispielsweise könnte auch angenommen werden, dass sich der Pro-Kopf-Wohnflächenbedarf – entgegen des historischen Trends – zukünftig verringert, oder dass es zu einer Minderung des Erwerbs von Konsumgütern kommt (vgl. auch die Diskussion in Abschnitt 3.4). Das UBA plant eigenen Angaben zufolge (UBA 2017) die Erarbeitung weiterer Klimaschutzszenarien, darunter ein Szenario „GreenLife“ mit deutlich weitergehenden Verhaltens- bzw. Lebensstiländerungen als im Szenario „GreenEe“.

2.2.3 Elektrifizierung

Als direkte und indirekte Elektrifizierung lässt sich die Substitution von fossilen Energieträgern in Endverbrauchssektoren durch Elektrizität (direkte Elektrifizierung) oder durch aus Strom gewonnene Energieträger (indirekte Elektrifizierung, z. B. Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe) bezeichnen. Elektrifizierung kann die Dekarbonisierung der Endverbrauchssektoren in zweierlei Hinsicht erheblich erleichtern: Erstens ermöglicht die Elektrifizierung in einigen Fällen den Einsatz effizienterer Technologien auf Seiten der Endverbraucher, was mit einer Minderung des Endenergiebedarfs verbunden ist. Dies gilt für die Substitution von Autos mit Verbrennungsmotor durch Elektroautos genauso wie für die Substitution konventioneller Schmelzöfen durch Induktionsschmelzöfen. Zweitens ermöglicht es die Elektrifizierung, im Falle einer überwiegend oder vollständig auf erneuerbaren Energien beruhenden Stromerzeugung, CO₂-arme bzw. CO₂-freie Endenergieträger einzusetzen.

Direkte und indirekte Elektrifizierung sind folglich auch weit verbreitete Strategien in den hier betrachteten Klimaschutzszenarien, wie Abbildung 2 zeigt. Alle Szenarien unterstellen, dass die bereits in den vergangenen Jahrzehnten zu beobachtende Elektrifizierung der Endenergiesektoren fortgesetzt bzw. beschleunigt wird. Umfang und Art der Elektrifizierung unterscheiden sich jedoch teils deutlich von Szenario zu Szenario. So sehen die beiden -80 %-Szenarien nicht vor, dass Wasserstoff und/oder synthetische Kraftstoffe bis 2050 in relevantem Maße eine Rolle spielen. Im Gegensatz dazu erwarten die drei ambitionierteren Szenarien, dass diese aus Strom gewonnenen Energieträger bis dahin eine relevante oder gar dominante Rolle im Energiesystem spielen. Die Summe der Anteile von Strom und aus Strom gewonnenen Energieträgern am gesamten Endenergiebedarf beträgt in diesen Szenarien Mitte des Jahrhunderts 50 („95 %-Pfad“) bis 80 % („GreenEe“).

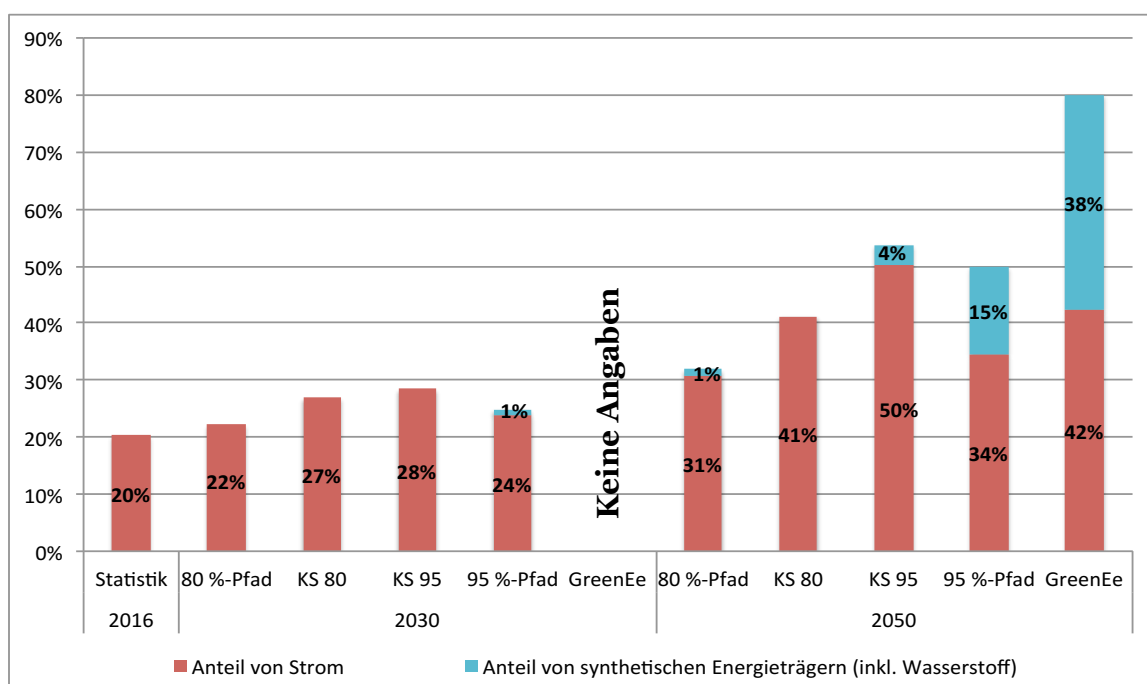


Abbildung 2: Anteile von Strom und aus Strom gewonnenen Energieträgern am gesamten Endenergieverbrauch im Jahr 2017 und den betrachteten Szenarien zufolge im Jahr 2050

Quellen: Angegebene Szenarien sowie AG Energiebilanzen (2018b) für den Statistik-Wert.

Die folgende Tabelle 5 betrachtet den Endenergieanteil von Strom und von aus Strom gewonnenen Energieträgern in den einzelnen Endverbrauchssektoren. Sie zeigt, dass die Elektrifizierungsstrategie den Szenarien zufolge in allen Endverbrauchssektoren eine bedeutende Rolle spielen wird. Gleichzeitig wird auch hier deutlich, dass in den ambitionierteren Szenarien tendenziell in stärkerem Maße auf eine Elektrifizierung der Sektoren gesetzt wird als in den weniger ambitionierten Szenarien. Dies gilt insbesondere für den Verkehrssektor. Während der kombinierte Anteil von Strom und aus Strom gewonnenen Energieträgern in den -80 %-Szenarien in diesem Sektor von 2 % im Jahr 2017 auf 21 % („80 %-Pfad“) bzw. 25 % (KS 80) im Jahr 2050 anwächst, steigt der entsprechende Anteil in den -95 %-Szenarien auf mindestens 62 („KS 95“) und bis zu 100 („GreenEe“). Die Gegenüberstellung der Szenarien in der Tabelle zeigt auch, dass es derzeit noch unterschiedliche Auffassungen über das wahrscheinliche oder bevorzugte Verhältnis zwischen direkter und indirekter Elektrifizierung im Verkehrssektor in einer dekarbonisierten Zukunft gibt.

Tabelle 5: Anteile der direkten und indirekten Stromnutzung in den verschiedenen Sektoren in den Jahren 1990 und 2017 sowie den betrachteten Szenarien zufolge im Jahr 2050

		Statistik		80 %-Pfad	KS 80	KS 95	95 %-Pfad	Green Ee
		1990	2017	2050				
Industrie	Direkt	25 %	31 %	31 %	37 %	44 %	34 %	53 %
	Indirekt	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	40 %
GHD	Direkt	24 %	37 %	k. A.	63 %	66 %	k. A.	56 %
	Indirekt	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	k. A.	8 %
Haushalte	Direkt	18 %	19 %	k. A.	36 %	42 %	k. A.	41 %
	Indirekt	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	k. A.	0 %
Verkehr	Direkt	2 %	2 %	18 %	25 %	37 %	24 %	27 %
	Indirekt	0 %	0 %	3 %	0 %	25 %	63 %	73 %

Quellen: Angegebene Szenarien sowie AG Energiebilanzen (2018b) für die Statistik-Werte.

2.2.4 Nutzung erneuerbarer Energien

Der weitere Anstieg der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bei gleichzeitiger Minderung der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen gilt als eine der zentralen Klimaschutzstrategien für Deutschland. Seit Beginn des letzten Jahrzehnts ist die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland kontinuierlich und deutlich angestiegen. Diese Entwicklung wurde wesentlich vorangetrieben durch das im Jahr 2000 in Kraft getretene Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Die Bruttostromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland stieg seither von 38 TWh im Jahr 2000 auf 218 TWh im Jahr 2017. Der Erneuerbaren-Anteil am Bruttostromverbrauch stieg im gleichen Zeitraum von knapp 7 % auf rund 36 %.

Wie Abbildung 3 zeigt, gehen alle betrachteten Szenarien für die nächsten Jahrzehnte von einer weiteren deutlichen Steigerung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien aus. Die Zuwächse werden sich den Szenarien zufolge dabei vor allem durch einen weiteren Ausbau der Windenergie (sowohl an Land als auch Offshore) und der Fotovoltaik ergeben. Wind- und Solarenergie weisen verschiedenen Untersuchungen zufolge in Deutschland unter den erneuerbaren Energien das größte zusätzliche technische und wirtschaftlich erschließbare Potenzial auf.

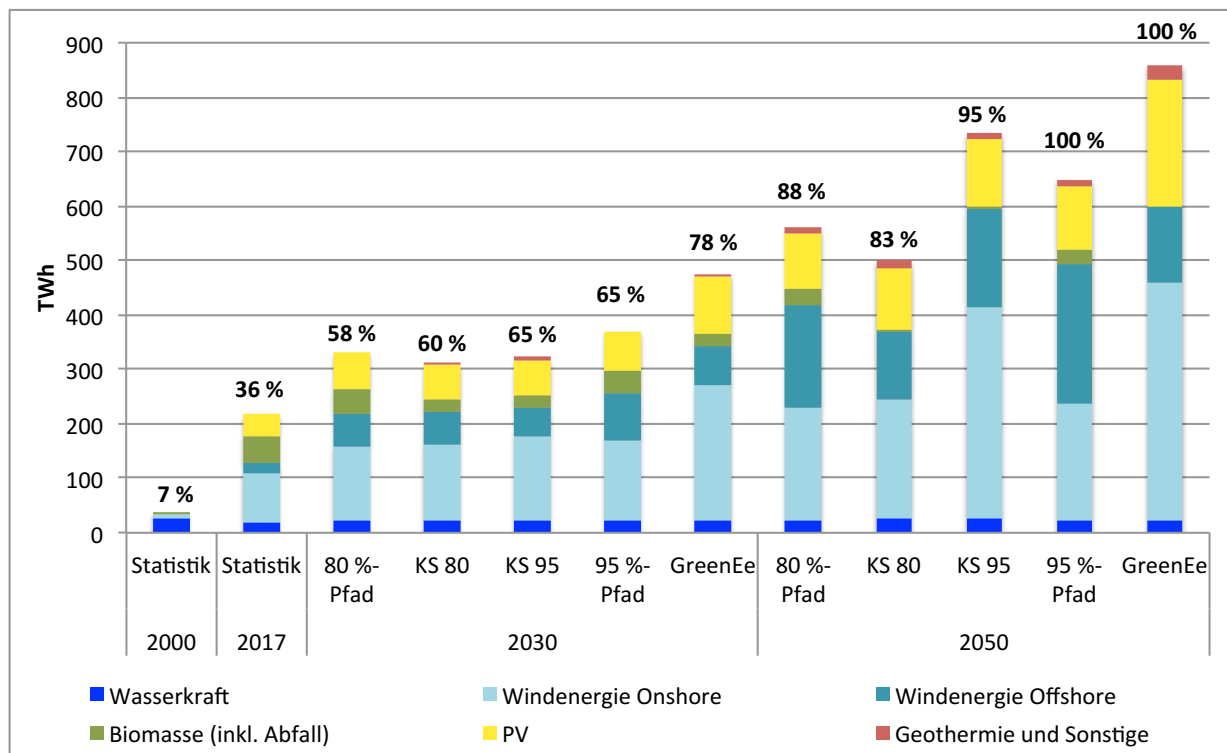


Abbildung 3: Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in den Jahren 2000 und 2017 sowie den betrachteten Szenarien zufolge in den Jahren 2030 und 2050 (in TWh)

Quellen: Angegebene Szenarien sowie AG Energiebilanzen (2018a) für die Statistik-Werte.

Allerdings unterscheidet sich der in den betrachteten Szenarien angenommene Erneuerbaren-Ausbau teilweise deutlich voneinander. So wächst z. B. der Beitrag der Erneuerbaren im Szenario „KS 80“ bis Mitte des Jahrhunderts „nur“ auf 500 TWh/a an, während er im Szenario „GreenEe“ auf rund 860 TWh/a und damit deutlich stärker steigt. (Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ist dabei im Jahr 2050 in allen drei betrachteten ambitionierteren -95 %-Szenarien höher als in den beiden betrachteten -80 %-Szenarien.) Ebenfalls unterscheiden sich die Szenarien in Bezug auf die jeweilige Bedeutung einzelner erneuerbarer Energieträger. So setzt beispielsweise das Szenario „95 %-Pfad“ bis Mitte des Jahrhunderts mit rund 260 TWh/a deutlich stärker auf die Offshore-Windenergie als das Szenario „GreenEe“, in dem dann nur rund 140 TWh/a auf den Meeren erzeugt werden. Dafür ist die Onshore-Windstromerzeugung im „GreenEe“-Szenario im Jahr 2050 mit 435 TWh rund doppelt so hoch wie die entsprechende Erzeugung im Szenario „95 %-Pfad“ (215 TWh).

Wie die folgende Tabelle 6 verdeutlicht, müsste der Ausbau der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung bis Mitte des Jahrhunderts in ähnlicher bzw. nur leicht reduzierter Intensität wie in den vergangenen 17 Jahren fortgesetzt werden, um die -80 %-Szenarien realisieren zu können. Die -95 %-Szenarien erfordern hingegen eine weitere Beschleunigung des Erneuerbaren-Ausbaus: Der durchschnittliche jährliche Anstieg der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien müsste von knapp 11 TWh zwischen 2000 und 2017 auf rund 13 TWh („95 %-Pfad“) bis 19 TWh („GreenEe“) im Zeitraum 2017 bis 2050 anwachsen.

Tabelle 6: Durchschnittlicher jährlicher Anstieg der Erneuerbaren-Stromerzeugung zwischen 2000 und 2017 sowie den betrachteten Szenarien zufolge zwischen 2017 und 2050 (in TWh/a)

Statistik	80%-Pfad	KS 80	KS 95	95%-Pfad	GreenEe
2000-2017	2017-2050				
11	10	9	16	13	19

Quellen: Angegebene Szenarien sowie AG Energiebilanzen (2018a) für den Statistik-Wert.

In Deutschland wird die Nutzung erneuerbarer Energien im Verkehrssektor und zur Wärmebereitstellung derzeit von der Biomasse dominiert (Tabelle 7). Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von nachhaltig nutzbarer Biomasse in Deutschland wird in den betrachteten Szenarien allerdings maximal eine moderate Steigerung der end-energetischen Nutzung von Biomasse angenommen. Im Szenario „GreenEe“ (UBA 2017) finden sich keine genauen Angaben zur endenergetischen Nutzung der Biomasse. Da in diesem Szenario jedoch mittel- bis langfristig komplett auf Anbaubio-masse verzichtet werden soll, ist davon auszugehen, dass diese Nutzung gegenüber heute sogar reduziert wird. Die Verwendung von Umweltwärme und Solarthermie, die beide vorrangig zur Raumwärmebereitstellung eingesetzt werden, wird den Szenarien zufolge gegenüber heute hingegen deutlich zunehmen. Anders als beim Einsatz erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung ist beim Einsatz erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung und im Verkehr kein Zusammenhang zwischen dem Umfang der Nutzung und dem Klimaschutzambitionsniveau der Szenarien erkennbar.

Tabelle 7: Endenergetische Nutzung erneuerbarer Energien für die Wärmebereitstellung und im Verkehr im Jahr 2017 sowie den betrachteten Szenarien zufolge im Jahr 2050 (in PJ)

	Statistik	80%-Pfad	KS 80	KS 95	95%-Pfad	GreenEe
	2017	2050				
Biomasse für Wärme	506	667	706	691	750	k. A.
Biokraftstoffe	109	101	116	109	180	
Erd- & Umweltwärme	49	468	221	254	509	
Solarthermie	29	140	149	131	148	
GESAMT	693	1376	1192	1185	1587	1015

Quellen: Angegebene Szenarien sowie AG Energiebilanzen (2018b) für die Statistik-Werte.

2.2.5 Import CO₂-freier Energieträger

Der Import CO₂-freier Energieträger stellt grundsätzlich eine weitere Möglichkeit dar, den Verbrauch fossiler Energieträger zu reduzieren. Mit CO₂-freien Energieträgern sind hier zum einen Strom und zum anderen synthetische Energieträger gemeint, sofern deren Erzeugung auf erneuerbaren Energien beruht und (bei der Herstellung synthetischer Energieträger) kein CO₂ aus fossilen Quellen eingesetzt wird.

Wie Abbildung 4 verdeutlicht, wird in vier der fünf betrachteten Szenarien – mit dem Szenario „80 %-Pfad“ als Ausnahme – angenommen, dass Deutschland bis Mitte des Jahrhunderts zu einem (Netto-) Importeur von CO₂-freien Energieträgern wird. In den Szenariostudien wird diese Annahme damit begründet, dass in anderen Teile

Europas und der Welt Regionen zu finden sind, die erhebliche Potenziale für die Nutzung erneuerbarer Energien aufweisen und deren Potenziale relativ kostengünstig erschlossen werden könnten. Hierzu gehören viele Küsten- und Meeresregionen Europas (für die Onshore- und Offshore-Windstromerzeugung) sowie der Süden Europas und Nordafrika (v. a. für die Solarstromerzeugung). Für Deutschland könnte es demnach in Zukunft möglich und wirtschaftlich sein, einen Teil des Energiebedarfs durch Strom und/oder synthetische Energieträger zu decken, die im Ausland auf Basis erneuerbarer Energien erzeugt wurden.

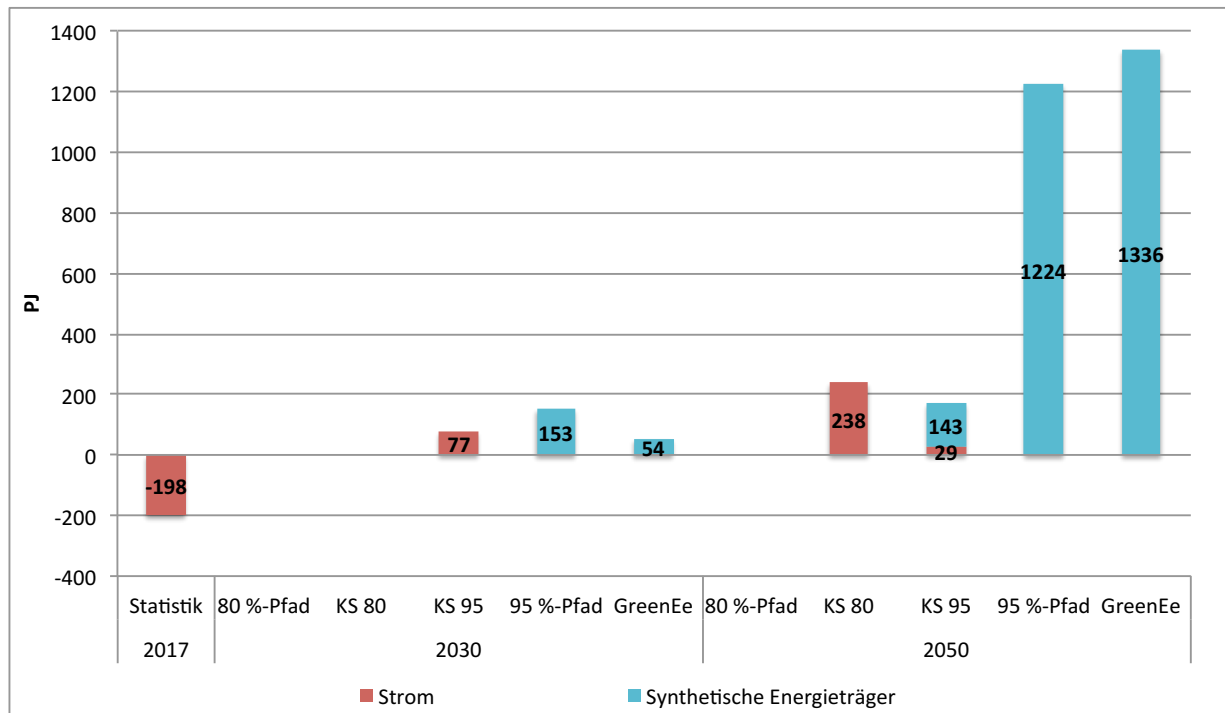


Abbildung 4: Nettoimport von Strom und synthetischen Energieträgern im Jahr 2017 sowie den betrachteten Szenarien zufolge in den Jahren 2030 und 2050 (in PJ)

Quellen: Angegebene Szenarien sowie AG Energiebilanzen (2018a) für den Statistik-Wert.

Zwei der betrachteten Szenarien nehmen an, dass Deutschland im Jahr 2050 – im Gegensatz zu heute – zu einem Nettoimporteure von Strom wird. Im Szenario „KS 80“ werden dann netto 66 TWh importiert, während es im Szenario „KS 95“ 8 TWh sind. Zum Vergleich: 2017 hat Deutschland 55 TWh netto exportiert.³ In den anderen drei Szenarien wird von einer ausgeglichenen Import-Export-Bilanz ausgegangen.

Die drei -95 %-Szenarien nehmen zudem an, dass im Jahr 2050 synthetische Energieträger – sowohl flüssige als auch gasförmige – importiert werden. Im Szenario „KS 95“ handelt es sich dabei mit 143 PJ um eine relativ geringe Größenordnung, während es in den beiden anderen -95 %-Szenarien mit gut 1.200 PJ („95 %-Pfad“) bzw. gut 1.300 PJ („GreenEe“) erhebliche Mengen sind. Allerdings sei zur Einordnung erwähnt, dass Deutschland derzeit rund 9.000 PJ/a an fossilen Energieträgern

³ Die hohen gegenwärtigen Nettostromexporte sind eine Folge der Kraftwerksüberkapazitäten in Deutschland, verbunden mit der Tatsache, dass ein Großteil dieser Kapazitäten geringere variable Erzeugungskosten aufweisen als ein Großteil der Kraftwerkskapazitäten im benachbarten Europa.

importiert und diese Menge in den Klimaschutzszenarien bis 2050 erheblich abnimmt, auf maximal ca. 1.400 PJ („95 %-Pfad“) bzw. sogar auf Null in dem ohne Industrie-CCS auskommenden Szenario „GreenEe“. Im „95 %-Pfad“ beginnen die Importe synthetischer Energieträger bereits in den 20ern, in „GreenEe“ im Jahr 2030. Die Studien weisen darauf hin, dass für eine solche Entwicklung eine zeitnahe Investitionsdynamik für entsprechende Anlagen im Ausland ausgelöst werden müsste.

Die Szenariostudien machen keine genauen Angaben dazu, aus welchen Ländern bzw. Regionen der Strom bzw. die synthetischen Energieträger importiert werden und auf Basis welcher Energieträger bzw. Technologien die Stromerzeugung erfolgt.

2.2.6 Nutzung von CCS an Industrieanlagen

Es wird gegenwärtig allgemein davon ausgegangen, dass der Einsatz von Technologien zur Abscheidung und Speicherung von CO₂ („Carbon Capture and Storage“, CCS) im Kraftwerksbereich sowohl aus wirtschaftlichen Gründen als auch aufgrund mangelnder öffentlicher Akzeptanz in Deutschland in Zukunft keine Rolle spielen wird. Diese Auffassung spiegelt sich in den betrachteten Szenarien, die allesamt im Umwandlungssektor nicht auf einen Einsatz von CCS-Technologie setzen.

Allerdings nehmen zwei der drei betrachteten -95 %-Szenarien („95 %-Pfad“ und „KS 95“) an, dass CCS-Technologie ab dem Jahr 2030 im Industriesektor eingesetzt wird, um ansonsten schwierig vermeidbare energie- und prozessbedingte CO₂-Emissionen deutlich zu reduzieren. Zu den CCS-Einsatzbereichen in den beiden Szenarien gehören beispielsweise die Zementherstellung, die Rohstahlproduktion und die Produktion bestimmter Chemikalien. Dabei ist der Einsatz von industriellem CCS im „95 %-Pfad“ im Vergleich zum Szenario „KS 95“ ausgeprägter. So werden im Szenario „95 %-Pfad“ im Jahr 2050 gut 90 Mt CO₂ abgeschieden, während es im Szenario „KS 95“ im gleichen Jahr 43 Mt sind. Zum Vergleich: Der gesamte CO₂-Ausstoß der Industrie (energiebedingte plus prozessbedingte Emissionen) betrug im Jahr 2016 rund 170 Mt (UBA 2018). Die Autoren beider Studien betonen, dass nach vorliegenden Untersuchungen in Deutschland und in der Nordsee hinreichend Speicherkapazitäten vorhanden sind, um die entsprechenden Mengen an CO₂ auch deutlich über 2050 hinaus aufzunehmen und dauerhaft zu speichern.

In den beiden betrachteten -80 %-Szenarien wird CCS hingegen aufgrund der verbundenen Kosten und Unsicherheiten bezüglich der gesellschaftlichen Akzeptanz auch im Industriesektor nicht eingesetzt. Die entsprechenden industriellen Emissionen können in diesen Szenarien aufgrund des deutlich größeren verbleibenden Spielraums bei den THG-Emissionen akzeptiert werden. Im dritten -95 %-Szenario („GreenEe“) wird ebenfalls komplett auf CCS verzichtet. Hier wird stattdessen angenommen, dass die Emissionen des Industriesektors auch ohne CCS auf nahezu Null reduziert werden können. Hierfür werden verschiedene so genannte „Breakthrough“-Technologien unterstellt, die im Laufe der nächsten Jahrzehnte zur technologischen Reife weiterentwickelt und dann umfassend in verschiedenen Industriesektoren eingesetzt werden müssen. Hierzu zählt z. B. die gasbasierte Direktreduktion bei der Primärstahlerzeugung oder die Nutzung inerte Anoden in der Primäraluminiumerzeugung. Im „GreenEe“-Szenario wird außerdem angenommen, dass der Bedarf nach verschiedenen Primärgrundstoffen durch deutliche Schritte in Richtung einer Kreislaufwirtschaft reduziert werden kann.

2.3 Wesentliche Erkenntnisse aus der Szenario-Metaanalyse

Die vorangegangene Metaanalyse aktueller Energie- und Klimaschutzszenarien für Deutschland wird in der folgenden Tabelle 8 zusammengefasst. Für jedes der fünf betrachteten Szenarien wird dargestellt, ob und wie stark die verschiedenen Emissionsminderungsstrategien bis zum Jahr 2050 jeweils Verwendung finden.

Tabelle 8: Übersicht über die unterschiedliche Nutzung zentraler Klimaschutzstrategien bis zum Jahr 2050 in den fünf analysierten Szenarien

Szenarien →		80 %- Pfad	KS 80	KS 95	95 %- Pfad	GreenEe
Energiebedingte THG-Reduktion 2050 (vs. 1990) →		-84 %	-85 %	-98 %	-100 %	-100 %
NACHFRAGE- SEITE	• Energieeffizienzverbesserungen	++	++	+++	++	++
	• Verhaltensänderungen	+	+	++	+	+
	• Elektrifizierung					
	Direkte Elektrifizierung	+	++	+++	++	++
	Indirekte Elektrifizierung (PtX)	o	o	+	++	+++
ANGEBOTSSEITE	• Nutzung emissionsfreier Energieträger					
	Erneuerbare für Stromerzeugung	++	++	++	++	+++
	Erneuerbare für Verkehr & Wärme	++	++	++	++	++
	Atomenergie	o	o	o	o	o
	• Import emissionsfreier Energieträger					
	Biomasse	o	o	o	o	o
	Strom	o	++	+	o	o
	Synthetische Energieträger (inkl. H ₂)	o	o	+	+++	+++
	• Nutzung von CCS/CCU					
	An Kraftwerken	o	o	o	o	o
	An Industrieanlagen	o	o	++	+++	o

Aus der Metaanalyse lassen sich unter anderem die folgenden drei zentralen Erkenntnisse ableiten:

1. Die Geschwindigkeit der Energiesystemtransformation in Deutschland muss gegenüber den vergangenen 15 bis 20 Jahren beschleunigt werden, um die langfristigen THG-Minderungsziele Deutschlands erreichen zu können.

Für fast alle betrachteten Minderungsstrategien lässt sich erkennen, dass die Geschwindigkeit der in Deutschland seit dem Jahr 2000 beobachteten historischen Energiesystemveränderungen eindeutig unzureichend ist, um bis 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 % (im Vergleich zu 1990) zu erreichen. Die einzige Ausnahme stellt hier die Zunahme der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energie dar. Wird jedoch eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 95 % angestrebt, was u. a. in Anbetracht der Ziele des Pariser Klimaabkommens angemessen erscheint, so müsste den Szenarien zufolge auch dies Strategie zügiger umgesetzt werden als in der Vergangenheit.

2. Die hauptsächlich verfolgten Klimaschutzstrategien im Energiesystem können von Szenario zu Szenario stark variieren. Diese Variation ist u. a. (allerdings nicht nur) auf unterschiedliche THG-Minderungsziele zurückzuführen.

Die vorangegangene Metaanalyse und deren Zusammenfassung in Tabelle 8 verdeutlichen, dass auch zwischen Szenarien mit ähnlichen Emissionsminderungszielen unterschiedliche Auffassungen darüber bestehen, ob und inwieweit einzelne Klimaschutzstrategien zukünftig eine Rolle spielen können oder sollten. Unterschiedliche Forscher bzw. Auftraggeber schätzen offenbar die mit der Umsetzung bestimmter Strategien verbundenen Risiken und Unsicherheiten teilweise unterschiedlich ein. Auf der Nachfrageseite gibt es beispielsweise unterschiedliche Auffassungen darüber, ob weit verbreitete Verhaltensänderungen hin zu weniger energieintensiven Lebensstilen verfolgt werden sollten bzw. ob eine solche Strategie erfolgreich sein kann. Auf der Angebotsseite gibt es hingegen u. a. hinsichtlich der Frage, ob der Einsatz von CCS in der Industrie auf ausreichende gesellschaftliche Akzeptanz stoßen würde und ob die zukünftigen ökonomischen Rahmenbedingungen einen breiten Einsatz dieser Technologie erlauben werden, unterschiedliche Einschätzungen.

Zweifellos bestehen für jede der diskutierten Klimaschutzstrategien Risiken und Unsicherheiten. Sofern das Erreichen langfristiger Klimaschutzziele tatsächlich eine Priorität für Politik und Gesellschaft ist, erscheint es daher aus heutiger Sicht sinnvoll, möglichst viele dieser unterschiedlichen Strategien zu verfolgen, sofern es keine grundsätzlichen Bedenken bezüglich ihrer jeweiligen Nachhaltigkeit gibt. Schließlich ist es wahrscheinlich, dass einige der Strategien scheitern werden bzw. weniger erreichen werden als gegenwärtig erhofft.

3. *Ambitionierte THG-Minderungsszenarien neigen gegenüber weniger ambitionierten Szenarien dazu, eine größere Zahl unterschiedlicher Klimaschutzstrategien zu nutzen und einige der Strategien in größerem Umfang einzusetzen.*

Es überrascht nicht, dass ambitioniertere THG-Minderungsszenarien gegenüber weniger ambitionierten Szenarien tendenziell eine größere Anzahl unterschiedlicher Strategien verwenden und bestimmte Strategien mit stärkerer Intensität verfolgen. Letzteres gilt insbesondere für die folgenden Strategien:

- Verhaltensänderungen hin zu weniger energieintensiven Lebensstilen werden in -95 %-Szenarien tendenziell häufiger bzw. ausgeprägter angenommen als in -80 %-Szenarien
- In -95 %-Szenarien wird die Strategie der Elektrifizierung – insbesondere die der indirekten Elektrifizierung in Form der Nutzung synthetischer strombasierter Kraftstoffe – deutlich stärker genutzt als in -80 %-Szenarien;
- Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird tendenziell in ambitionierteren Szenarien noch stärker forciert.
- In den ambitionierten -95 %-Szenarien werden auch Importe von Strom und/oder synthetischen Energieträgern tendenziell in teilweise deutlich größerem Umfang unterstellt.
- Die Nutzung von CCS im Industriesektor in zwei der drei betrachteten -95 %-Szenarien deutet darauf hin, dass der Einsatz dieser Technologie in Zukunft erforderlich sein könnte, wenn weitgehende THG-Minderungen erzielt werden sollen und andere Strategien (wie die Elektrifizierung verschiedener Industrieprozesse über „Breakthrough“-Technologien oder ein bedeutender Import CO₂-freier Energieträger aus dem Ausland) scheitern sollten.

Aus den grundsätzlichen Unterschieden zwischen -80 %- und -95 %-Szenarien hinsichtlich des Energiesystems im Jahr 2050 lässt sich außerdem folgern, dass es im Zeitverlauf immer schwieriger werden dürfte, einen einmal eingeschlagenen Pfad in Richtung einer 80-prozentigen THG-Reduktion in Richtung eines deutlich höheren Reduktionsziels (z. B. -95 %) zu verlassen. So lassen sich Hinweise finden, dass eine gegenwärtige Konzentration auf moderate Emissionsminderungsziele zu erheblichen Hindernissen für das Erreichen höherer Emissionsminderungsziele in der Zukunft führen kann:

- Starke Effizienzsteigerungen im Gebäudesektor erfordern frühzeitiges Handeln, da es Zeit braucht, bis 2050 den größten Teil des heutigen Gebäudebestandes zu sanieren.
- Ob und wie Verhaltens- bzw. Lebensstiländerungen initiiert oder unterstützt werden können, sollte weiter erforscht werden. Die Konsensfindung über Änderungen gesellschaftlicher Normen wird jedoch wahrscheinlich viel Zeit in Anspruch nehmen, da diese Änderungen umstritten sein werden, nicht zuletzt, weil entsprechende Änderungen mit den Zielen einiger einflussreicher Interessengruppen in Widerspruch stehen dürften. Die Gesellschaft sollte daher frühzeitig darüber diskutieren, ob und inwieweit Verhaltensänderungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen – oder vielleicht auch aus anderen Gründen – verfolgt werden sollen.
- Eine erhebliche Zunahme der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien erfordert erhebliche Änderungen und Erweiterungen der Übertragungs- und Verteilnetze, die typischerweise viele Jahre in Anspruch nehmen, um geplant, beschlossen und umgesetzt zu werden.
- Bevor die indirekte Elektrifizierung zur Reduktion der CO₂-Emissionen des Energiesystems beitragen kann, müssen einzelne Technologien weiterentwickelt, Systemwissen aufgebaut und neue Infrastrukturen in bedeutendem Maßstab aufgebaut werden. Zuvor müssen Entscheidungen über die gewünschte Systemstruktur getroffen werden, zum Beispiel hinsichtlich der Frage, ob (hauptsächlich) Wasserstoff oder (hauptsächlich) synthetische Kraftstoffe in den Endverbrauchssektoren verwendet werden sollen oder ob synthetische Energieträger importiert oder (hauptsächlich) im Inland produziert werden sollen. Diese Entscheidungen sind von großer Bedeutung, da aus heutiger Sicht ein CO₂-freie bzw. CO₂-neutrale Energieversorgung Deutschlands nur bei einer breiten Verwendung von Wasserstoff und/oder synthetischen Kraftstoffen im deutschen Energiesystem vorstellbar ist. Es erscheint daher sinnvoll, frühzeitig die Weichen in diese Richtung zu stellen, anstatt intensive Bemühungen zu verfolgen, um einen breiten Einstieg in die Nutzung dieser Energieträger in den kommenden Jahrzehnten zu vermeiden.
- In Hinblick auf CCS in der Industrie wären frühzeitige Investitionen in Industrieanlagen sowie in die Transport- und Lagerinfrastruktur erforderlich. Dies bedeutet, dass zwischen der Planung und Umsetzung dieser Strategie und der tatsächlichen Realisierung der erwarteten Emissionsreduktionen mindestens ein oder zwei Jahrzehnte liegen werden.

3 Darstellung und Diskussion potenziell naturverträglicher Klimaschutzstrategien

Nachdem in Kapitel 2 ein Überblick über derzeitige Vorstellungen möglicher Transformationspfade hin zu einem klimaverträglichen deutschen Energiesystem gegeben wurde, werden in diesem 3. Kapitel diejenigen Klimaschutzstrategien vorgestellt, deren Umsetzung nach heutigem Wissensstand keine oder höchstens geringe negative Auswirkungen auf die Natur hätte. Dies soll zu einem besseren Verständnis der einzelnen Strategien beitragen, unter anderem in Hinblick auf deren Umsetzungs Voraussetzungen sowie THG-Minderungspotenzial. Eine breitere Diskussion dieser Strategien in Gesellschaft und Politik könnte Anstöße für deren (verstärkte) Umsetzung liefern und auf diese Weise zu einem ambitionierten und gleichzeitig naturverträglichem Klimaschutz beitragen. Konkret werden im Verlauf dieses Kapitels die folgenden acht (potenziell) naturverträglichen Klimaschutzstrategien diskutiert:

- Stärkere Nutzung von Fotovoltaik anstatt von Windenergie
- Stärkere Nutzung anderer Erneuerbarer anstatt von Biomasse
- Deutliche Erhöhung der Energieeffizienz
- Verbreitung von suffizienteren Lebensstilen
- Import von erneuerbarem Strom oder synthetischen Energieträgern
- Einsatz von CCS im Industriesektor zur Reduktion des Strombedarfs
- Förderung natürlicher Senken
- Materialsubstitution/-effizienz und Kreislaufwirtschaft

3.1 Stärkere Nutzung von Fotovoltaik anstatt von Windenergie

Windenergieanlagen können negative Einflüsse auf Menschen und Tiere haben (Zerahn 2017). Einige Menschen stören sich an dem Anblick von Windenergieanlagen, insbesondere wenn diese in Sichtweite ihrer Wohnungen aufgestellt sind und/oder als starke Beeinträchtigung eines Landschaftsbilds wahrgenommen werden. Teilweise berichten Menschen, die in der Nähe von Windenergieanlagen leben, auch von Lärmbelästigungen durch den Betrieb der Anlagen. Relevante Auswirkungen auf Tiere können sich durch die mit der Errichtung und dem Betrieb der Windenergieanlagen einhergehenden Landnutzungsänderungen sowie durch die Anlagen selbst ergeben (Störungen des Lebensraums oder Kollisionen). In der Öffentlichkeit wird besonders die Gefahr der Kollision von Vögeln und Fledermäusen mit Windenergieanlagen diskutiert.⁴ Diese Gefahr sollte möglichst durch eine sorgfältige Standortwahl

⁴ Präzise Schätzungen der Vogel- und Fledermaus-Todesfälle durch Windenergieanlagen sind schwierig. Die Zahl der getöteten Vögel wurde jüngst für Deutschland auf 10.000 bis 100.000 pro Jahr geschätzt (bei einer installierten Onshore-Kapazität von rund 50.000 MW, s. Mayer 2017). Für die USA und Kanada liegen Schätzungen vor, die von 214.000 bis 368.000 getöteten Vögeln pro Jahr ausgehen (auf Grundlage einer installierten Kapazität von rund 70.000 MW, Erickson et al. 2014). Zumindest in Bezug auf Vögel liegt die geschätzte Gesamtzahl der jährlich durch Windenergieanlagen getöteten Individuen um mehrere Größenordnung niedriger als für andere direkt oder indirekt durch den Menschen verursachten Todesursachen. So wurden für die USA die jährlich durch Hauskatzen verursachten Vogel-Todesfälle auf knapp 700 Millionen geschätzt, die durch Gebäude auf knapp 600 Millionen und die durch Autos auf rund 200 Millionen (Loss et al. 2015). Allerdings ist aus Sicht des Artenschutzes nicht nur die Summe der getöteten Vögel relevant, sondern auch deren Zusammensetzung nach Arten. Beispielsweise gibt es die Sorge, dass der Bestand des seltenen Rotmilans in einzelnen Regionen durch Windenergieanlagen gefährdet sein könnte (Bellebaum et al. 2013; Schaub 2012). Die Zahl der durch Windenergieanlagen getöteten Fledermäuse liegt in Deutschland vermutlich höher als die der Vögel. Es besteht die Gefahr, dass einzelne Fledermausarten durch diesen Einfluss aussterben könnten, auch wenn diese Einschätzung durch die vielfach relativ geringen Kenntnisse über Fledermaus-Populationen mit Unsicherheiten behaftet ist (Voigt et al. 2015, Arnett/May 2016, Frick et al. 2017).

und auch durch Maßnahmen während des Betriebes verringert werden (Arnett/May 2016, May et al. 2015, Schuster et al. 2015).

Aufgrund der potenziellen negativen Einflüsse auf Menschen und Tiere wird der Ausbau der Windenergie sowohl an Land als auch auf dem Meer von einigen Menschen – nicht zuletzt von vielen Naturschützer – kritisch gesehen.⁵ Demgegenüber steht die Tatsache, dass der Windenergie im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern (mit Ausnahme möglicherweise der Fotovoltaik, s. unten) das größte technisch-ökologische Potenzial für die Stromerzeugung in Deutschland zugesprochen wird (UBA 2014, BMVI 2015, UBA 2010a) und die Erzeugungskosten von Onshore-Windenergieanlagen derzeit niedriger liegen als bei Biogas-, Geothermie- und kleinen PV-Anlagen (Kost et al. 2018, Kölbel/Eggeling 2012).

Vermutlich primär aus diesen Gründen setzen auch die vorliegenden Klimaschutzenszenarien für Deutschland auf einen starken weiteren Ausbau der Windenergie. Wie in Abbildung 3 (in Kapitel 2) bereits dargestellt wurde, erhöht sich den betrachteten Szenarien zufolge die Stromerzeugung der Windenergieanlagen in Deutschland von 107 TWh im Jahr 2017 auf mindestens 343 TWh („KS 80“) und auf bis zu 576 TWh („GreenEe“) im Jahr 2050. Die Windstromerzeugung steigt in den Szenarien also innerhalb von knapp 35 Jahren auf mindestens das Dreifache und bis zu das Fünffache des gegenwärtigen Wertes. In vier der fünf betrachteten Szenarien stammt dabei auch Mitte des Jahrhunderts der meisten Windstrom aus Onshore-Anlagen, nur im Szenario „95 %-Pfad“ dominiert die Offshore-Erzeugung.

Die folgende Abbildung 5 verdeutlicht die Entwicklung der Onshore-Windenergie in den betrachteten Szenarien, indem auf die installierte Kapazität und die Anlagenzahl fokussiert wird. Die installierte Kapazität der Onshore-Anlagen steigt von knapp 51 GW im Jahr 2017 auf mindestens 85 GW („KS 80“) und auf bis zu 150 GW („KS 95“) im Jahr 2050. Dieses Wachstum muss allerdings nicht zwingend mit einem Anstieg der Anlagenanzahl einhergehen. Grundsätzlich wird angenommen, dass sich das in der Vergangenheit beobachtete Wachstum der typischen Größe neuer Anlagen auch in Zukunft fortsetzen wird. Wird – wie in Abbildung 5 angenommen – die durchschnittliche Größe der Onshore-Bestandsanlagen dadurch von gegenwärtig (2017) 1,8 MW auf 3 GW im Jahr 2030 und auf 5 GW im Jahr 2050 steigen, so würde dies bedeuten, dass in den betrachteten Szenarien in Zukunft entweder ähnlich viele einzelne Anlagen stünden als heute, oder sogar weniger.⁶

⁵ Dabei ist zu betonen, dass das Potenzial der Windenergienutzung zur Minderung der fossilen Stromerzeugung zu einer signifikanten Einsparung von THG-Emissionen und somit zu einer Minderung des (auch) aus Sicht des Natur- und Artenschutzes problematischen Klimawandels beitragen kann. Einer Metastudie zu dem Thema zufolge (Urban 2015) kann damit gerechnet werden, dass 10 bis 15 % der in der Literatur untersuchten Arten bedingt durch den Klimawandel aussterben würden, sollte sich die mittlere Erdtemperatur bis zum Jahr 2100 – gegenüber dem vorindustriellen Niveau – um 3 bis 4 °C erhöhen. Zudem können 47 % der lokalen Ausrottungen von Tieren, die im 20. Jahrhundert dokumentierte wurden, auf den Klimawandel zurückgeführt werden (Wiens 2016).

⁶ Die Szenarien machen keine Angaben über die jeweils angenommene durchschnittliche Größe der Windenergieanlagen, daher wird hier eine eigene Annahme getroffen. Diese kann als konservativ angesehen werden. Zumindest legt dies eine aktuelle Studie des Fraunhofer IWES (2017) nahe. Dort wird angenommen, dass die durchschnittliche Nennleistung neuer Onshore-Anlagen bereits 2030 6 MW erreicht und 2050 bei 10 MW liegt. Wird eine durchschnittliche Lebensdauer der Anlagen von 20 Jahren unterstellt, so dürfte die durchschnittliche Größe des Anlagenbestands bei einer solchen Entwicklung im Jahr 2050 also über 6 MW betragen. Entsprechend wäre die Anzahl der Anlagen im Jahr 2050 niedriger als in Abbildung 5 dargestellt. Wird hingegen sehr konservativ angenommen, dass das weitere Wachstum neuer Onshore-Anlagen in den nächsten Jahrzehnten nur noch sehr langsam voranschreitet (im Jahr 2017 betrug die durchschnittliche Kapazität neu errichteter Onshore-Anlagen in Deutschland 2,98 MW (Deutsche WindGuard 2018)) und die durchschnittliche Größe der Bestandsanlagen 2050

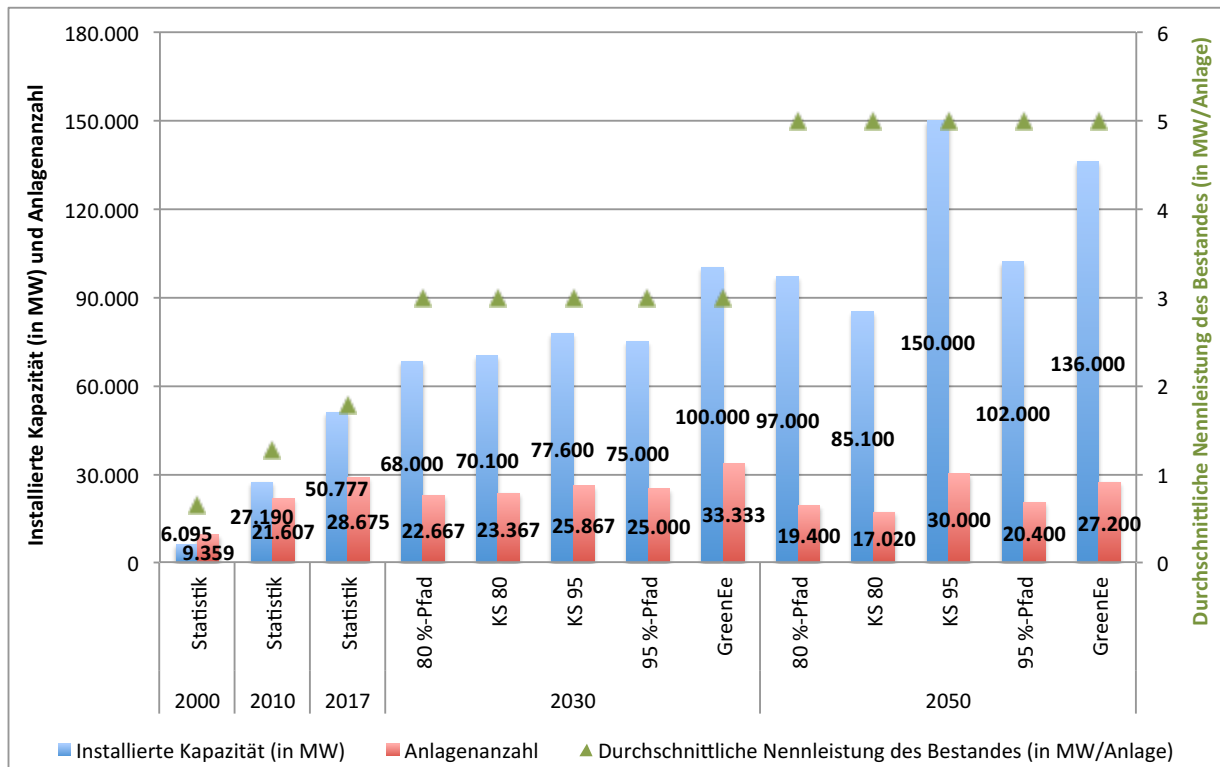


Abbildung 5: Installierte Kapazität (in MW) und Anlagenzahl von Onshore-Windenergieanlagen nach Szenarien bei einer angenommenen durchschnittlichen Nennleistung von 3 MW/Anlage im Jahr 2030 und 5 MW/Anlage im Jahr 2050

Quellen: Angegebene Szenarien sowie Bundesverband WindEnergie (2018) für die Statistik-Werte.

Dabei ist darauf hinzuweisen, dass entsprechende Anlagen mit einer höheren Nennleistung auch höher und größer wären als heutige Anlagen. Entsprechend erhöht sich zum einen die Sichtbarkeit einzelner Anlagen, zum anderen auch der Flächenbedarf pro Anlage. Auch die Gefahr für Vögel und Fledermäuse hängt neben der Höhe der Anlagen in erster Linie vom Rotordurchmesser ab, und dieser ist pro Leistungseinheit bei größeren Anlagen nur geringfügig kleiner als bei kleineren Anlagen. Insofern dürfte die Kapazität der Anlagen ein besserer Indikator für die Einflüsse auf Menschen und Tiere sein als die Anzahl der Anlagen. Gleichzeitig besteht die Hoffnung, dass eine leichte Abnahme bzw. zumindest kein weiterer starker Anstieg der Anlagenanzahl das Potenzial bietet, bei der Standortwahl der Anlagen stärker auf naturschutzfachliche Belange zu achten.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Ansatzpunkte, um zukünftig negative Effekte der Windenergie auf den Landschafts- und Naturschutz zu minimieren. Dazu gehört insbesondere eine sorgfältige Standortwahl neuer Anlagen (Dijks et al. 2018) und ggf. Anpassungen der Betriebsweise. Die vorliegende Literatur zu dem Thema macht deutlich, dass es noch Forschungsbedarf gibt, um die Erkenntnisse zu den Vermei-

nur bei 4 MW liegt, so läge die Gesamtzahl der Anlagen in zwei der fünf betrachteten Szenarien über dem heutigen Wert: Bei 37.500 Anlagen im Szenario „KS 95“ und bei 34.000 Anlagen im Szenario „GreenEe“ (gegenüber 28.675 Anlagen im Jahr 2017). Entsprechende Abbildungen mit abweichenden Annahmen zur zukünftigen durchschnittlichen Nennleistung finden sich in Anhang A. Dort findet sich auch eine Darstellung der möglichen Entwicklung bei der Offshore-Windenergie.

dungspotenzialen zu verbessern. Zum anderen kann eine Minderung der zukünftigen Strom- bzw. Energienachfrage (durch Effizienz und/oder Suffizienz, vgl. Abschnitte 3.3 und 3.4) sowie der Import von Strom bzw. von auf Strom basierenden synthetischen Energieträgern (vgl. Abschnitt 3.5) den (inländischen) Ausbaubedarf der Windenergie reduzieren und auf diese Weise die Auswirkungen auf Landschaft und Naturschutz reduzieren. Schließlich gibt es mit Verschiebungen im Mix der erneuerbaren Stromerzeugung eine weitere Möglichkeit zur Minderung des Windenergiebedarfs. Diese Möglichkeit wird im Folgenden diskutiert.

Das bei weitem größte Potenzial unter den erneuerbaren Energien zur Kompensation einer Minderung der Windstromerzeugung hat vorliegenden Studien zufolge die Stromerzeugung auf Basis der Fotovoltaik. Das UBA (2010a) schätzt das technisch-ökologische Potenzial von PV-Anlagen, die auf Dach- und Fassadenflächen sowie sonstigen Siedlungsflächen wie Parkplatzüberdachungen oder Lärmschutzwänden stehen, „konservativ“ auf rund 250 TWh/a. Eine aktuelle Dissertation von Fath (2018) ermittelt auf Grundlage zeitlich und räumlich hochaufgelöster Einstrahlungssimulationen sogar ein deutlich höheres ökonomisches Potenzial der Stromerzeugung aus Dach- und Fassadenanlagen von über 1.000 TWh/a. Hinzu kommen noch die Potenziale von Freiflächenanlagen, die einer Studie des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI 2015) zufolge auf mindestens 143 GW (ca. 130 TWh/a) abgeschätzt werden können.

Zumindest die auf Siedlungsflächen gebauten PV-Anlagen weisen dabei nach gegenwärtigen Kenntnissen keine bedeutsamen negative Einflüsse auf die Tierwelt auf (Hernandez et al. 2014, Gasparatos et al. 2017) und haben eine geringere Flächeninanspruchnahme als die Windenergie (Matthes et al. 2018).⁷ Die Fotovoltaik genießt zudem in der Gesellschaft eine besonders hohe Akzeptanz (Agentur für Erneuerbare Energien 2018). Insofern könnte es überraschen, dass die betrachteten Szenarien nicht stärker auf eine PV-Stromerzeugung setzen, um so den teilweise umstrittenen bzw. aus Sicht des Naturschutzes problematischen Ausbau der Windenergie zu begrenzen. So liegt die PV-Stromerzeugung Mitte des Jahrhunderts in vier der fünf betrachteten Szenarien bei „nur“ 100 bis 123 TWh/a (im Jahr 2017 lag sie bei 40 TWh). Lediglich im Szenario „GreenEe“ wird im Jahr 2050 mit rund 230 TWh deutlich mehr Strom aus PV-Anlagen erzeugt.

Die folgende Abbildung 6 verdeutlicht, dass sich in den meisten der betrachteten Szenarien das Verhältnis zwischen Windstromerzeugung und PV-Stromerzeugung gegenüber 2017 (2,7:1) in Zukunft weiter zugunsten der Windstromerzeugung erhöht (bis 2050 auf 3:1 bis 4,6:1). Nur im Szenario „GreenEe“ liegt das Verhältnis Mitte des Jahrhunderts etwas niedriger als derzeit, nämlich bei 2,5:1.

⁷ Auswertungen einzelner Solarkraftwerke aus den USA legen nahe, dass große PV-Freiflächenanlagen – wie auch große solarthermische Stromerzeugungsanlagen – zu einer (bezogen auf die Kapazität) vergleichbaren Vogelsterblichkeit führen können wie Windenergieanlagen. Die Gründe für die Sterblichkeit an PV-Großanlagen sind dabei weitgehend unklar (Walston Jr. et al. 2016). Diese Forschungsergebnisse legen den Bedarf weiterer Forschung nahe, um ein besseres Verständnis der regional vermutlich sehr verschiedenen – Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf die Tierwelt zu gewinnen.

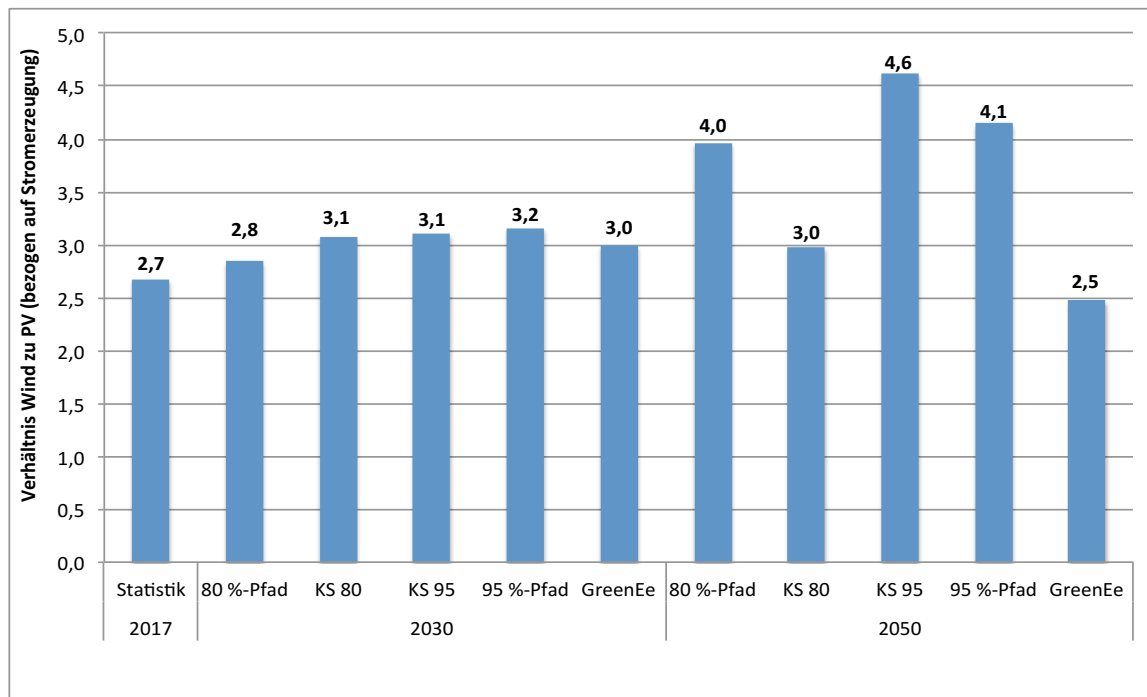


Abbildung 6: Verhältnis zwischen Windstromerzeugung und PV-Stromerzeugung im Jahr 2000 sowie in den Jahren 2030 und 2050 nach den in Kapitel 2 betrachteten Szenarien

Quellen: Angegebene Szenarien sowie AG Energiebilanzen (2018a) für den Statistik-Wert.

Die Szenariostudien diskutieren die Gründe für ihre Annahmen zum Ausbau der verschiedenen erneuerbaren Energien nicht im Detail. Die folgenden Gründe könnten aber grundsätzlich mögliche Erklärungen für die zumeist geringe Nutzung des vorhandenen PV-Potenzials bzw. den stärkeren Fokus auf die Windenergieerzeugung darstellen:

- **Aktuelle energiepolitische Zielsetzungen:** Das aktuell gültige Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2017) legt Ausbauziele unter anderem für Onshore- und Offshore-Windenergie sowie für Fotovoltaik fest. Demnach müssten in den 2020er Jahren jährlich rund 3.500 MW Onshore- und Offshore-Kapazität neu zugebaut werden (inkl. Ersatz alter Anlagen). Für die Fotovoltaik wird im EEG ein Ausbau von 2.500 MW pro Jahr anvisiert. Berücksichtigt man, dass die auf Land und im Meer errichteten neuen Windenergie im Durchschnitt mindestens eine doppelt so hohe Anzahl an Volllaststunden realisieren dürften als PV-Anlagen, so ergäbe sich daraus ein Wind/PV-Verhältnis bei der Stromerzeugung neuer Anlagen von rund 3:1.
- **Unterschiede in den Stromgestehungskosten:** Bis vor einigen Jahren waren die Stromgestehungskosten der Onshore-Windenergie deutlich niedriger als die der Fotovoltaik. Infolge der in den letzten Jahren dramatisch gesunkenen Kosten von Fotovoltaikanlagen gilt dies mittlerweile nur noch für kleine PV-(Dach-)Anlagen. Die Stromgestehungskosten von Onshore-Windenergie und PV-Freiflächenanlagen sowie großen PV-Dachanlagen bewegen sich mittlerweile in einer ähnlichen Größenordnung (jeweils ca. 4 bis 8 €-cent/kWh, gegenüber ca. 7 bis 12 €-cent/kWh für kleine PV-Dachanlagen, Kost et al. 2018). Dennoch könnte die in der Vergangenheit übliche stärkere Kostendifferenz sowie die noch bestehende moderate Kostendifferenz zwischen Onshore-

Windenergie und kleinen PV-Anlagen (die wiederum die höchste gesellschaftliche Akzeptanz haben, s. Agentur für Erneuerbare Energien 2018) ein Grund dafür sein, dass in bestehenden Szenarien deutlich stärker auf Windstrom als auf PV-Strom gesetzt wird.

- **Potenziell höhere Systemdienlichkeit von Windstrom:** Bei einem weiteren starken PV-Zubau wird es zunehmend Situationen geben, in denen die Stromerzeugung in den Mittagsstunden über dem dann auftretenden Strombedarf liegen wird und ihre Nutzung über Speicher (z. B. Batterien, Pumpspeicherwerke, Wärmespeicher) zeitlich verlagert werden muss. Mit einer solchen Verlagerung sind Kosten und Umwandlungsverluste verbunden, was einen Grund dafür darstellen könnte, dass in vorliegenden Szenarien stärker auf Windenergie gesetzt wird. (Die Windstromerzeugung weist gegenüber der Stromerzeugung aus Fotovoltaik ein weit weniger ausgeprägtes tageszeitliches Einspeiseprofil auf.) Zudem führt das derzeitige Verhältnis zwischen Wind- und Fotovoltaik-Stromerzeugung (etwa 2,7:1) auch zu einer – in der Summe – saisonal relativ gleichmäßigen Stromerzeugung aus diesen beiden Energieträgern (Wirth 2018). Die Beibehaltung eines solchen Verhältnisses könnte also den saisonalen Ausgleichs- bzw. Speicherbedarf minimieren, während eine deutlich stärkere Forcierung der Fotovoltaik zu einem Ungleichgewicht mit einer höheren Stromerzeugung in den Sommermonaten führen würde.

Die energiepolitischen Zielsetzungen bezüglich des Ausbaus einzelner erneuerbarer Energieträger sind selbstverständlich politisch gestaltbar, so dass eine zukünftige Anpassung der Ziele insbesondere beim Vorliegen guter Gründe möglich sein sollte.

Bezüglich der höheren Stromgestehungskosten bei kleinen PV-Anlagen ist anzumerken, dass sich diese voraussichtlich in Zukunft weiter an die Gestehungskosten der Onshore-Windenergie annähern werden. So rechnen Vartiainen et al. (2015) zwischen 2015 und 2030 mit einem Rückgang der Stromgestehungskosten von Dach-PV-Anlagen in Deutschland um rund 45 %. Dann könnte die Spannweite der Kosten dieser Anlagen ungefähr auf dem derzeitigen Niveau der Onshore-Windenergie (ca. 4 bis 8 €-cent/kWh) liegen. Zwar sind auch weitere Kostensenkungen der Onshore-Windenergie möglich, diese werden aber voraussichtlich vergleichsweise moderat ausfallen (Kost et al. 2018).

Auch die potenziell höhere Systemdienlichkeit von Windstrom bzw. der aus Sicht des Stromsystems optimale Mix zwischen Windstrom und PV-Strom ist letztlich eine Frage der Wirtschaftlichkeit. Die in den vergangenen Jahren beobachteten und auch für die Zukunft erwarteten starken Kostensenkungen nicht nur der Fotovoltaik-Anlagen, sondern auch der Batteriespeicher könnten den für die Zukunft erwarteten ökonomisch optimalen Mix zwischen beiden Erzeugungsformen zuletzt in Richtung der Fotovoltaik verschoben haben. Es ist möglich, dass die hier betrachteten Szenariostudien diese Entwicklung noch nicht (vollständig) berücksichtigt haben.⁸

⁸ In diesem Zusammenhang ist erwähnenswert, dass bereits in der Vergangenheit die zukünftig erwartete Stromerzeugung aus Fotovoltaik-Anlagen in aufeinanderfolgenden Szenariostudien nach oben angepasst wurde. So lag der Wert der PV-Stromerzeugung im Jahr 2050 beispielsweise in dem vom BMU in Auftrag gegebenen „Leitszenario 2008“ (Nitsch 2008) bei 28 TWh und in dem Szenario „Innovation ohne CCS“ in einer von WWF beauftragten Studie (Kirchner et al. 2009) bei 29 TWh. Bereits im Jahr 2013 wurden diese Werte übertroffen.

So legt eine aktuelle Studie (Ram et al. 2017) nahe, dass die Fotovoltaik nicht nur über ein ausreichendes Potenzial verfügt, um einen deutlich größeren Anteil der zukünftigen deutschen Stromerzeugung zu übernehmen als ihr in vorliegenden Szenarien zugewiesen wird, sondern dass dies auch ökonomisch sinnvoll sein könnte. Dem kostenoptimalen Szenario dieser Studie zufolge werden im Jahr 2050 rund 270 TWh Strom aus PV-Anlagen erzeugt, während rund 285 TWh aus Windkraftanlagen stammen. Das Verhältnis zwischen beiden Energieträgern liegt hier also fast bei 1:1. Die Studie berücksichtigt in ihrer Optimierung auch die Systemkosten (v. a. die Kosten für Speicher und Stromnetze), vereinfacht allerdings insofern, als dass Deutschland isoliert betrachtet wird, die Verknüpfungen des deutschen Stromsystems mit dem Ausland also unberücksichtigt bleiben.

Eine weitere aktuelle Studie von Matthes et al. (2018) hat für Deutschland ein Szenario „Fokus Solar“ entwickelt, in dem der Anteil zwischen Windstromerzeugung und PV-Stromerzeugung im Jahr 2050 nur bei 1,6:1 liegt, während das Verhältnis im Szenario „Energiewende-Referenz“ 4,3:1 beträgt. Im Vergleich der beiden Szenarien kommen die Autorinnen und Autoren zu dem Schluss, dass der Flächenbedarf für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Szenario „Fokus Solar“ bei 2,0 % der gesamten Landesfläche liegt und damit 0,5 Prozentpunkte niedriger als in dem deutlich stärker auf Windenergie setzenden Szenario „Energiewende-Referenz“. Dadurch erlaubt (nur) das Szenario „Fokus Solar“ eine Begrenzung der für die Onshore-Windenergie genutzten Flächen auf die als „weitestgehend restriktionsfrei“ bewerteten Flächen. Das Szenario „Fokus Solar“ weist den Kostenberechnungen zufolge zwar etwas höhere Systemkosten auf, dieser Nachteil sei mit 1,0 bis 1,5 % der Systemkosten allerdings „geringfügig“.

Eine aktuelle Studie im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (Walter et al. 2018), die explizit die Potenziale einer hohen Naturverträglichkeit der Energiewende untersucht, beschreibt sogar Stromsystemszenarien für Deutschland, die eine deutliche PV-Dominanz aufweisen. Das Verhältnis zwischen Windstromerzeugung und PV-Stromerzeugung liegt in den drei in dieser Studie entwickelten Szenarien im Jahr 2050 zwischen 0,4:1 und 0,7:1. Allerdings wurden im Rahmen der Studie keine genaueren Untersuchungen zu den Systemkosten durchgeführt. Ebenfalls wurde für die Erstellung der Szenarien kein zeitlich hochauflösendes (z. B. stündliches) Energiesystemmodell verwendet, um zu prüfen, ob bzw. wie die mit den Szenarien einhergehenden Herausforderungen für die Versorgungssicherheit gelöst werden können. Insofern sollten die Szenarien dieser Studie, wie die Autorinnen und Autoren auch selber anmerken, als „explorativ“ angesehen werden.

Für Europa als Ganzes liegen weitere Studien vor, die sich der Frage nach dem kostenoptimalen Verhältnis zwischen Wind und Fotovoltaik widmen. Nach Ram et al. (2017) ist eine Dominanz der Fotovoltaik im zukünftigen europäischen Stromsystem kostenoptimal – mit einem Verhältnis zwischen Wind und Fotovoltaik von etwa 1:1,6 im Jahr 2050. Nach Reichenberg et al. (2018) liegt das optimale Verhältnis Mitte des Jahrhunderts in Europa bei etwa 1:1.

Nach Gils et al. (2017) sind in einer zukünftigen vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Stromversorgung in Europa zwar die Systemkosten eines Winddominierten Stromsystems (mit einem Verhältnis zwischen Wind- und PV-Strom von 4:1) niedriger als in einem System mit einem kleineren Wind:PV-Verhältnis, al-

lerdings sind die Kostendifferenzen insbesondere zwischen dem kostenoptimalen Wind-dominierten System und einem ausgeglichenen System gering. Selbst zwischen dem Wind- und dem PV-dominierten System unterscheiden sich die Systemkosten der Studie zufolge bei einer Vollversorgung durch erneuerbare Energien lediglich um moderate 16 % (entsprechend 1,6 €-cent/kWh).

Cebulla et al. (2018) und Gils et al. (2017) zeigen, dass PV-dominierte Stromsysteme einen höheren Bedarf an elektrischen Speichern aufweisen als Wind-dominierte Stromsysteme. Letztere benötigen allerdings ein stärker ausgebautes Stromnetz. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Matthes et al. (2018) für Deutschland, finden dabei allerdings nur relativ geringfügige Abweichungen. Cebulla et al. (2018) weisen in dem Zusammenhang darauf hin, dass vorliegende Szenariostudien tendenziell den zukünftigen Netzausbau und die damit verbundenen Kosten sehr optimistisch einschätzen und möglicherweise Bauverzögerungen und gesellschaftliche Opposition gegen Netzausbau nicht (ausreichend) berücksichtigen. (Speicherbedarf könne hingegen dezentral und auf verschiedene Weisen erbracht werden und seine ausreichende zukünftige Realisierung sei daher weniger unsicher.) Dies könnte zu einer Voreingenommenheit („Bias“) zugunsten eines Wind-dominierten Systems führen.

Aus diesem Blickwinkel könnte auch die Schlussfolgerung gezogen werden: Eine Transformationsstrategie für das Stromsystem, die ein relativ kleines zukünftiges Verhältnis zwischen Wind- und PV-Stromerzeugung anstrebt, also einen stärkeren Fokus auf den PV-Ausbau legt, könnte „robuster“ sein (also eine höhere Realisierungswahrscheinlichkeit aufweisen) als eine Strategie, die – wie die in Kapitel 2 analysierten Szenarien – stärker auf Onshore- und Offshore-Windenergie setzt. Zwar könnte ein zukünftiges Stromsystem mit einem niedrigeren Wind:PV-Verhältnis moderat teurer sein (abhängig von der zukünftigen Entwicklung u. a. der PV- und Speicherkosten), die Akzeptanz in der Bevölkerung könnte dennoch höher sein. Gleiches gilt für die Naturverträglichkeit, zumindest sofern beim PV-Ausbau überwiegend auf Dachanlagen bzw. die Nutzung anderer Siedlungsflächen gesetzt wird und bei der Auswahl von Freiflächen-Standorten und der Konstruktion der Anlagen sehr stark die Belange des Naturschutzes einfließen (Herden et al. 2009).

Die folgende Tabelle 9 liefert eine Einschätzung, inwieweit durch einen starken Ausbau der Fotovoltaik die zukünftige Nutzung der Windkraft in Deutschland begrenzt werden kann. Dabei wird vereinfacht angenommen, dass nur die Onshore-Windenergie verdrängt wird, während die Offshore-Windenergie auf einem bestimmten (gegenüber den Szenarien relativ niedrigem) Niveau konstant gehalten wird. Auf Grundlage der vorliegenden -95 %-Szenarien wird abgeleitet, dass im Jahr 2050 eine inländische Stromerzeugung aus Wind- und PV-Anlagen von zusammen ungefähr 650 TWh/a nötig sein wird. Ebenfalls auf Grundlage dieser Szenarien wird ferner unterstellt, dass sich diese 650 TWh/a im Referenzfall (der sich auch grob an den aktuellen energiepolitischen Ausbauzielen orientiert) auf 500 TWh/a Windstrom und 150 TWh/a PV-Strom aufteilen würden (Verhältnis Wind zu PV von 3,3:1). Die Offshore-Windstromerzeugung wird auf 120 TWh/a festgesetzt. Die Tabelle stellt auf Grundlage der diskutierten Literatur auch ein 1:1-Verhältnis zwischen Wind und PV dar, aber auch einen abgeschwächten PV-Fokus mit einem Verhältnis von 2:1.

Tabelle 9: Abschätzung der Onshore-Windenergieanlagen, auf die im Jahr 2050 bei einem starken Fokus auf den PV-Ausbau verzichtet werden könnte

	Onshore-Windstromerzeugung	PV-Stromerzeugung	Verhältnis zw. Wind- und PV-Erzeugung	Benötigte Onshore-Windkapazität (Annahme: 2.500 VLS)	Anzahl der benötigten Onshore-Anlagen	
					Bei 3 MW-Anlagen- größen	Bei 5 MW-Anlagen- größen
Referenz	380 TWh	150 TWh	3,3:1	152 GW	50.667	30.400
Stärkerer PV-Fokus	313 TWh	217 TWh	2:1	125 GW	41.667 (- 9.000)	25.000 (-5.400)
Massiver PV-Fokus	205 TWh	325 TWh	1:1	82 GW	27.333 (-23.333)	16.400 (-14.000)

Diese überschlägige Rechnung legt nahe, dass ein starker Fokus auf die Fotovoltaik bis Mitte des Jahrhunderts rund 14.000 Onshore-Windenergieanlagen der 5 MW-Größenordnung (bzw. rund 23.000 Onshore-Anlagen der 3 MW-Größenordnung) verzichtbar machen könnte. Zukünftige Forschung sollte untersuchen, ob eine so starke PV-Stromerzeugung bzw. ein Wind:PV-Verhältnis von 1:1 tatsächlich technisch zu vertretbaren Kosten umgesetzt werden kann, welche Bedingungen (z. B. in Bezug auf den Ausbau der Verteilnetze und der Speicherkapazitäten) dafür notwendig wären und wie relevant mögliche ökologischen Nachteile (z. B. infolge des Ressourcenbedarfs für PV-Anlagen und ggf. zusätzlich benötigte Speichertechnologien) einer solchen Strategie sind.

3.2 Stärkere Nutzung anderer erneuerbarer Energien anstatt von Biomasse

Das technisch-ökologische Potenzial von weitgehend unbedenklich nutzbarer Biomasse ist in Deutschland gegenüber dem Potenzial anderer erneuerbarer Energiequellen wie z. B. Wind und Sonne gering und speist sich primär aus dem Potenzial der Reststoffbiomasse. Während bisherige Praktiken zur Erzeugung von Anbaubiomasse u. a. aus der Perspektive des Naturschutzes kritisch zu sehen sind, bieten alternative Anbaumethoden ein gewisses Potenzial, das allerdings noch der belastbaren Quantifizierung und teilweise auch erst der Praxiserprobung bedarf. Eine ausführlichere Diskussion über die Begrenztheit des Biomassepotenzials und die unterschiedlichen zu beachtenden Aspekten bei Anbau- und bei Reststoffbiomasse ist in Anhang B zu finden.

In Bezug auf die Energiegewinnung ist die Fotosynthese gegenüber der technischen Stromgewinnung aus Sonnenlicht (direkt oder auch über den Umweg von Wind) wesentlich ineffizienter. Im Vergleich zum Biomasseanbau stellt die Nutzung der in Frage kommenden Flächen mittels Fotovoltaik oder Windenergieanlagen eine deutlich höhere Energieausbeute pro Flächeneinheit in Aussicht. Während Holz jährlich 25-150 GJ/ha an Energie liefern kann, kann Anbaubiomasse in der Form von Energiepflanzen mit 50-250 GJ/ha i. d. R. eine höhere Ausbeute pro Fläche liefern. Demgegenüber kann in Deutschland mittels Fotovoltaik eine vielfach höhere Ausbeute von 3.000-5.500 GJ/ha erreicht werden, während Solarthermie nochmals höhere Flächenausbeuten von 8.000-10.000 GJ/ha ermöglicht – wobei allerdings die solarthermisch gewonnene Wärme „nur“ zur Deckung des Wärmebedarfs und nicht zur

Stromerzeugung genutzt werden kann. Windenergieanlagen an Land bzw. auf dem Meer bieten zwar mit 800-1.500 GJ/ha bzw. 2.500-3.500 GJ/ha geringere Flächenausbeuten als die direkte Nutzung von Solarenergie, sind gegenüber der Biomassenutzung jedoch immer noch weit effizienter (Wüstemann et al. 2017; nach Hartje et al. 2015) und ermöglichen an Land auf Teilen der in Anspruch genommenen Flächen zudem eine zusätzliche Flächennutzung z. B. für den Biomasseanbau.

Aktuellen Szenarien zufolge wird die Verstromung von Biomasse auch in einer vollständig auf erneuerbaren Energien beruhenden Stromversorgung nicht zwingend für einen Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung benötigt (s. Abschnitt 2.2.4), da voraussichtlich sowohl auf der Nachfrageseite (z. B. „Demand-Response“-Maßnahmen) als auch auf der Angebotsseite (z. B. Batteriespeicher und synthetische Brennstoffe) alternative Flexibilitätsoptionen zur Verfügung stehen werden.

Geothermie wird in Deutschland aufgrund der gegebenen Temperaturen im Gestein voraussichtlich auch in Zukunft vorwiegend zur Wärmegewinnung (und weniger zur Stromgewinnung) genutzt. Dabei ist der Einsatz von Geothermie ortsabhängig jeweils im Einzelfall zu bewerten, denn es besteht hierbei sowohl die Gefahr von Erdstößen als auch von Bodenhebungen (wie dies z. B. im badischen Staufen eindrücklich zu sehen ist). Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen kann Geothermie – bzw. Umweltwärme allgemein (d. h. auch die Nutzung von Wärme in der Luft und im Wasser) – ortsabhängig einen bedeutenden Beitrag zur Wärmebedarfsdeckung leisten, sodass der Bedarf an Biomasse-Brennstoffen reduziert werden kann.

Solarthermie kann ebenfalls eine der Wärmegewinnung dienende Ergänzung darstellen, liefert allerdings vor allem in der warmen Jahreszeit außerhalb der Heizperiode hohe Erträge. Da Wärme schwer saisonal speicherbar ist und Wärmepumpen in Kombination mit stromerzeugenden Erneuerbaren-Technologien z. T. höhere Wirkungsgrade erbringen können, ist der ausschließliche Einsatz von Solarthermie nur eingeschränkt sinnvoll. Als saisonale Ergänzung kann Solarthermie allerdings den Bedarf an Biomasse reduzieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es für die verschiedenen heutigen und potenziellen zukünftigen Einsatzbereiche der energetischen Biomassenutzung auch in einem zukünftigen klimaneutralen Energiesystem Alternativen gibt, wie dies auch das Szenario „GreenEe“ des UBA (2017) nahelegt (s. Abschnitt 2.2.4). So kann die Nutzung von Biokraftstoffen im Verkehrssektor durch Strom oder aus Strom gewonnenen synthetischen Energieträgern vermieden bzw. verringert werden, im Stromsystem gibt es u. a. mit der Fotovoltaik und mit diversen Speichertechnologien (inkl. synthetischer Brennstoffe) alternative Erzeugungs- und Flexibilitätsoptionen, im Raumwärmebereich können u. a. Umweltwärme und Solarthermie bedeutende Beiträge liefern und beim Wärmebedarf in der Industrie können Strom und/oder synthetische Energieträger eingesetzt werden. In allen potenziellen Biomasse-Einsatzbereichen, insbesondere aber bei der Raumwärmeerzeugung, können zudem Energieeinsparungen durch Effizienz und Suffizienz den Bedarf an Biomasse signifikant reduzieren.

3.3 Deutliche Erhöhung der Energieeffizienz

Im Gegensatz zu den anderen in diesem Kapitel diskutierten potenziell naturverträglicheren Klimaschutzstrategien gibt es in Hinblick auf eine zukünftig nötige deutliche Steigerung der Energieeffizienz keine grundsätzlichen Unterschiede zwischen allen analysierten Szenarien. Wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, nehmen alle untersuchten Szenarien an, dass sich die Endenergieproduktivität in Zukunft deutlich schneller erhöhen wird als in den vergangenen Jahren. Grundlage für eine solchen Entwicklung wären sowohl „klassische“ Effizienzverbesserungen als auch Effizienzverbesserungen, die sich durch eine voranschreitende Elektrifizierung ergeben können – insbesondere im Verkehrssektor durch eine breite Verdrängung von Verbrennungsmotoren durch effizientere Elektromotoren und bei der Raumwärme durch einen Anstieg der mit elektrischen Wärmepumpen beheizten Gebäude.

Auch wenn es in den Szenarien im Detail Unterschiede bezüglich der realisierbaren Effizienzpotenziale gibt, so deutet die hohe Relevanz der Energieeffizienz in allen Szenarien darauf hin, dass diese Option bezüglich ihrer Realisierungsmöglichkeit und/oder bezüglich möglicher negativer Folgen weithin als vorteilhaft eingeschätzt wird, insbesondere im Vergleich zu vielen anderen Klimaschutzstrategien. Potenzielle negative Folgen wie Ressourcenverbrauch, Verschlechterungen der Raumluft oder auch Verlust von Schlaf- und Nistquartieren verschiedener Tierarten (wie Fledermäusen) werden vereinzelt in Bezug auf die für eine Erhöhung der Energieeffizienz zentrale Gebäudesanierungsstrategie erwähnt. Unter Sachverständigen herrscht jedoch Einigkeit darüber, dass diese potenziellen Probleme bei sachgemäßer Durchführung von Sanierungen vermieden bzw. minimiert werden können (BfN 2016, FNR 2014, Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz 2014).

Eine grundsätzlichere Herausforderung für die Energieeffizienzstrategie ist der so genannte „Rebound-Effekt“, d. h. die Beobachtung, dass durch Effizienzmaßnahmen eingesparte Energie zu einem gewissen Teil durch zusätzlichen Konsum und einhergehenden Energiebedarf wieder „aufgefressen“ wird. Unter anderem kann zusätzlicher Konsum – so eine These – durch die mit der Effizienzmaßnahme einhergehende Kosteneinsparung induziert bzw. erst ermöglicht werden. Bezüglich der tatsächlichen Größenordnung der den Einsparmaßnahmen entgegenwirkenden Rebound-Effekte gibt es in der Literatur unterschiedliche Einschätzungen, die von niedrigen zweistelligen Prozentwerten bis zu Werten von deutlich über 50 % reichen. Darüber hinaus werden in letzter Zeit neben solchen „homogenen“ Rebound-Effekten auch „heterogene“, sogenannte „cross“-Rebound-Effekte betrachtet, bei denen Energieeffizienzmaßnahmen z. B. zu einem Mehrbedarf anderer stofflicher Ressourcen oder von Land führt (Freire-González/Font Vivanco 2017).

Auf der anderen Seite sollte im Zuge der Diskussion um Rebound-Effekte nicht vergessen werden, dass Energieeffizienzmaßnahmen häufig einen Nutzen aufweisen, der über die reine Minderung des Energiebedarfs und der einhergehenden CO₂-Emissionen hinausgeht (Thema et al. 2017). So können bestimmte Energieeffizienzmaßnahmen zu einer Minderung von „Energiearmut“ beitragen oder dafür sorgen, dass angemessene statt (zuvor) zu niedrige Raumtemperaturen vorherrschen (Thomas 2012).

Von den untersuchten Energieszenarien wird der Rebound-Effekt nur in Repenning et al. (2015) explizit erwähnt. So wird in dieser Studie insbesondere unterstellt, dass in den beiden Klimaschutzszenarien „KS 80“ und „KS 95“ zur Vermeidung von Rebound-Effekten „die durch steigende Effizienz sinkenden Kilometerkosten im Straßenverkehr ausgeglichen [werden], z. B. durch Erhöhung der Mineralölsteuer bzw. fahrleistungsabhängige Maut.“

Letztlich könnte die Bedeutung der Rebound-Effekte bei der in den Klimaschutzszenarien angenommenen konsequenten Verfolgung der Effizienzstrategie insofern an Bedeutung verlieren, da die angenommene Realisierung sehr weitgehender Effizienzpotenziale tendenziell dazu führen wird, dass mittel- bis langfristig nicht mehr überwiegend die kostengünstigen „low-hanging fruits“-Maßnahmen mit ihren einhergehenden (hohen) Nettokostensparnissen genutzt werden können. Stattdessen werden zunehmend auch solche Effizienzmaßnahmen durchgeführt werden (müssen), die in der Summe keine oder nur sehr geringe Nettoersparnisse aufweisen, deren Energiekostensparnisse also nicht oder kaum die (zusätzlichen) Investitionskosten decken. In diesen Fällen werden durch die Effizienzmaßnahmen keine oder kaum Mittel frei, die in zusätzlichen, potenziell energieintensiven Konsum gesteckt werden können.

Zukünftige Rebound-Effekte relevanter Größenordnung können allerdings nicht ausgeschlossen werden (Font Vivanco et al. 2015). Es erscheint daher sinnvoll, darauf hinzuwirken, dass jede Effizienzstrategie möglichst auch Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Einhegung des Rebound-Effekts enthalten sollte. Bei einer relevanten (erwarteten) Senkung der Energiekosten durch Effizienzmaßnahmen kann beispielsweise eine höhere Besteuerung von Energie dem Rebound-Effekt entgegenwirken, ebenso sollten Zusatzbelastungen anderer Ressourcen möglichst weitgehend vermieden werden. Auch die Kombination von Effizienz mit suffizienteren Lebensstilen (s. Abschnitt 3.4) kann Rebound-Effekte eindämmen.

Klar ist allerdings auch, dass eine gegenüber der Vergangenheit deutliche Beschleunigung der Effizienzfortschritte – trotz eines breiten Konsenses ihrer Vorteilhaftigkeit in Wissenschaft, Gesellschaft und Politik – kein Selbstläufer ist. Die Effizienzfortschritte in Deutschland im Laufe der vergangenen Jahre waren ernüchternd und gegenüber den Zielen bisher völlig unzureichend (Löschel et al. 2018). Vielfach wird darauf hingewiesen, dass die bestehenden energiepolitischen Rahmenbedingungen offenbar nicht ausreichen, um eine Beschleunigung der Energieeffizienz herbeizuführen. Ende 2014 verabschiedete die Bundesregierung ihren „Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz“, der konkrete Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz vorschlug. Einige der vorgeschlagenen Maßnahmen sind jedoch noch nicht (umfassend) umgesetzt worden und die umgesetzten Maßnahmen blieben aktuellen Auswertungen zufolge (Harthan et al. 2018; Weyland/Steuwer 2018; Löschel et al. 2018) bezüglich der erreichten Effizienzverbesserungen hinter den Erwartungen zurück.

Entsprechend erscheint es von hoher Bedeutung, dass zeitnah neue bzw. deutlich verstärkte politische Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz beschlossen und umgesetzt werden. Denkbare Maßnahmen sollen hier nicht im Detail besprochen werden, die „Expertenkommission zum Monitoring-Prozess ‚Energie der Zukunft‘“ empfiehlt aber beispielsweise, eine „für alle Sektoren wirksame CO₂-Bepreisung als zentrales Steuerungsinstrument“ und hält es außerdem „für notwen-

dig, die Mittel für die Energieeffizienz und für die Gebäudesanierung um eine Größenordnung aufzustocken, die geeignet ist, die große Aufgabe eines klimaneutralen Gebäudebestands in den kommenden 30 Jahren wirklich zu schaffen.“ Weyland und Steuer (2018) empfehlen in der Energieeffizienzpolitik eine geringere Scheu, stärker auf regulative Politikinstrumente zu setzen. Breit wirkende Instrumente, die zu deutlichen Effizienzsteigerungen führen können, wie Energieeffizienzverpflichtungen und überarbeitete Ausschreibungsprogramme sollten genauso wie Anpassungen der Energiebesteuerung ins Auge gefasst werden. Konkrete Vorschläge zur Weiterentwicklung der Energieeffizienzpolitiken finden sich auch in Dinges et al. (2017).

3.4 Verbreitung von suffizienteren Lebensstilen

Gerade im (energie-)technischen und wirtschaftlichen Diskurs dominiert die Idee einer "Effizienzrevolution", die mit Konsistenzstrategien im Sinne eines starken Ausbaus der erneuerbaren Energien einhergeht (Sommer/Welzer 2014 S. 71–96). Suffizienzmaßnahmen spielen in der Regel keine oder nur eine untergeordnete, stark individualisierte und moralisierte Rolle, die sich beispielsweise in Form von Verhaltensänderungskampagnen manifestiert. Die Akzeptanz für Suffizienzansätze wächst allerdings derzeit, einhergehend mit der Erkenntnis aus der Energieeffizienz- und Rebound-Effekt-Forschung (Sorrell 2010 S. 1792), dass Nachhaltigkeit sowohl verbesserte Effizienz als auch ein Prinzip der "Suffizienz" erfordern dürfte. Eine vertiefte Erläuterung der Grundgedanken von Suffizienz ist in Anhang C zu finden.

Es lassen sich im Kontext energieintensiver Güter und Dienstleistungen drei Hauptstrategien hervorheben (Samadi et al. 2017), die der Erreichung von Suffizienz dienlich sind:

- *Veränderung individueller Präferenzen* - hier sind die moralischen Diskussionen und Vorstellungen vom "guten Leben" (Schneidewind/Zahrnt 2013; Schneidewind/Zahrnt 2014) relevant. Eine solche Strategie setzt bei Individuen an, funktioniert also „von unten nach oben“ (bottom-up) und wäre selbst mit libertären Einstellungen voll kompatibel. Gängige Umsetzungen setzen darauf, über Information, Aufklärung und normative Kampagnen Einstellungs- und Verhaltensänderungen bei Verbrauchern herbeizuführen. Widerstand gegen solche Strategien ist vergleichsweise gering, da niemand in seinem (umweltschädigenden) Verhalten notwendigerweise eingeschränkt wird, was von vielen als zu verteidigende Freiheit erachtet bzw. gerahmt wird. Allerdings wird das Potenzial solcher Strategien angezweifelt, aktuelle globale Trends erfolgreich zu verändern (Gould et al. 2004; Pineault 2016): „*Alle Verantwortung auf den individuellen Verbraucher zu verlagern, ist weder fair noch zielführend*“ (Fischer et al. 2013 S. 5).
- *Die Änderung der relativen Preise* zielt darauf ab, die tatsächlichen gesellschaftlichen Kosten von Produkten, Dienstleistungen oder Verhaltensweisen auszudrücken, um die Verbraucher dazu zu bringen, von umweltschädlichen Optionen Abstand zu nehmen. Effektiv bedeutet dies eine (relative) Verteuerung von als umweltschädlicher erachteten Produkten – wobei jeweils betrachtet werden muss, welche Produkte stattdessen verstärkt konsumiert werden. Eine solche Top-Down-Strategie lässt individu-

elle Entscheidungen effektiv nur teilweise offen. Mineralöl- und Treibhausgassteuern fallen in diese Kategorie, und auch eine Fleischsteuer oder eine verstärkte Subventionierung pflanzlicher Bioprodukte wären derartige Ansätze.

- *Politisch auferlegte Verbote oder Grenzen* werden zumeist als unvereinbar mit individuellen Freiheiten empfunden, obwohl ein Verbot von weit verbreiteten unerwünschten Gütern oder Handlungen auch emanzipatorische Fähigkeiten innerhalb einer Gesellschaft haben kann (vgl. Loske 2014; ebenso Pettit 2003, 2007). Diese Top-Down-Strategie wird auch als „erzwungene Suffizienz“ („forced sufficiency“) bezeichnet (Samadi et al. 2017).⁹ Abhängig von der Rahmung kann auch ein Tempolimit als eine solche Maßnahme angesehen werden, da sich manche Personen in ihrer Freiheit eingeschränkt sehen mögen, sehr schnell Auto fahren zu dürfen.¹⁰

Aus diesen Betrachtungen wird schon deutlich, dass die Grenzen der skizzierten Kategorien nicht absolut sind und es sehr darauf ankommt, welche Rahmung vorgenommen wird bzw. sich gesellschaftlich durchsetzt.

Fischer et al. (2013) betonen die Relevanz von Suffizienzmaßnahmen im Bereich Energie und Klimaschutz insbesondere für *Pkw-Ersatz*, das *Stromsparen*, die *Ernährungsumstellung auf mediterrane Kost* und die *Wohnflächenreduktion* – die allesamt zu den „Top Ten“ der Energiesparmöglichkeiten im privaten Haushalt gehören (Grießhammer et al. 2010). Pkw-Ersatz, Stromsparen und Ernährungsumstellung sind dabei gesellschaftlich vergleichsweise anschlussfähig, was deren Umsetzung erleichtert. Besonders relevant sind dabei Felder mit einem hohen Potenzial für *gesellschaftlichen Strukturwandel* (Fischer et al. 2013), wie dies besonders bei der Ernährungsumstellung gegeben erscheint (Umstellung der Landwirtschaft). Dies gilt ebenso für die Wohnflächenreduktion, die allerdings auf mehr Widerstand stoßen und eine geringe *Ausstrahlungswirkung* auf potenzielle Nachahmende haben dürfte.

Eine pauschale Quantifizierung des Einsparpotenzials¹¹ ist dahingehend schwierig, da Suffizienz nicht binär betrachtet werden kann, sondern abhängig von der individuellen bzw. gesellschaftlichen Bereitschaft in unterschiedlicher Intensität betrieben werden kann oder wird. Fischer et al. (2013) kommen dementsprechend für Suffizienzmaßnahmen hinsichtlich Kochen, Waschen und IKT-Nutzung in einem mit energieeffizienten Geräten ausgestatteten Haushalt, welche keine bis wenig empfundene Einschränkungen erfordern, auf ein Strom-Einsparpotenzial von ca. 13 % durch z. B. kleinere Geräte, während sehr weitgehende Suffizienzmaßnahmen, die mit starken oder sehr starken Einschränkungen bzw. großem Aufwand einhergehen, ein Einsparpotenzial von über 80 % aufweisen. Diese subjektiv empfundenen Aufwände sind allerdings eher schwer zu verallgemeinernde Größen.

⁹ Mikroökonomisch betrachtet wird eine Wahloption entfernt, und ein entsprechendes Bedürfnis kann dann entweder nicht mehr oder nur auf anderem und zumeist kostenintensiverem Weg befriedigt werden.

¹⁰ „Die individuelle und milieuspezifische Bewertung von Nutzen kann sehr unterschiedlich sein. Wollten wir eine Suffizienzdefinition von diesem individuellen Erleben abhängig machen, würde dieselbe Handlung unterschiedlich eingestuft, je nachdem, wer sie ausführt“ (Fischer et al. 2013 S. 9–10).

¹¹ Das maximale realistische Minderungspotenzial kann unter der Annahme bestimmt werden, dass die Option von der größtmöglichen Zahl von Akteuren angenommen wird, unter Berücksichtigung realistischer und struktureller Zwänge und, soweit möglich, indirekter Auswirkungen und Rebound-Effekte (Faber et al. 2012).

In Tabelle 10 ist eine Übersicht potenzieller Suffizienzmaßnahmen und ihrer Wirksamkeit hinsichtlich absoluter und relativer THG-Emissionsreduktion für die bezüglich Suffizienz zentralen Bereiche Mobilität, Ernährung und Wohnen dargestellt. Tabelle 4 im vorherigen Kapitel liefert eine Übersicht über die in den betrachteten Szenarien berücksichtigten Suffizienzmaßnahmen. Es fällt auf, dass von dem hier skizzierten Potenzial nur ein geringer Teil in den betrachteten Szenarien angenommen wird. Dies liegt vermutlich zu einem wesentlichen Teil daran, dass es bislang nur zögerliche Bestrebungen gibt, derartige Suffizienzstrategien politisch zu unterstützen – möglicherweise auch, weil sie dem Wirtschaftswachstum abträglich wären (siehe von Winterfeld 2017).

Eine gesteigerte Reparaturfreundlichkeit und Verhaltensänderungen hin zu mehr Serviceorientierung („Nutzen statt Besitzen“) bieten – über eine Verlängerung der Produktnutzungsdauern – weitere Potenziale zur Reduktion des Energiebedarfs. Für diese Strategien liegen jedoch – ebenso wie für Arbeitszeitreduktionen – bislang keine quantitativen Abschätzungen der potenziellen Minderungseffekte vor und es ist zu beachten, dass sie je nach Ausgestaltung auch mit Rebound-Effekten verbunden sein können.

Tabelle 10: In der Literatur als (maximal) realistisch eingeschätztes CO₂-Minderungspotenzial verschiedener Suffizienzstrategien bis zum Jahr 2030

Sektor und übergeordnete Strategie	Maßnahme	CO ₂ -Minderungspotenzial	Quellen
Mobilität			
Kauf und Nutzung kleinerer Pkw		-18 bis -21 % pro Pkm	Faber et al. (2012)
Energieeffizientere Fahrzeugnutzung	Energieeffizienterer Fahrstil	-3 % (bezogen auf Gesamtemissionen des Personenverkehrs)	van Sluisveld et al. (2016); Faber et al. (2012); UBA (2010b)
	Car Sharing	keine Pkm-Verringerung, aber geringerer Fahrzeugbestand (Effekt unklar, u. a. abhängig von Pkw-Lebensdauer)	
	Stärkere Nutzung von Fahrgemeinschaften	-2 % (bezogen auf Gesamtemissionen des Personenverkehrs)	
Langlebigere Fahrzeuge		Ggf. Verbrauchserhöhung, aber Ressourcenschonung, Nettoeffekt unklar	van Sluisveld et al. (2016); Faber et al. (2012)
Nutzung nachhaltigerer Transportmittel	Stärkere ÖPNV- und Zugnutzung anstatt Automobilnutzung	-5 % (bezogen auf Gesamtemissionen des Personenverkehrs)	UBA (2010b)
	Mehr Fahrradnutzung und Gehen anstatt Automobilnutzung	-3 % (bezogen auf Gesamtemissionen des Personenverkehrs)	
Verringerung der Reisedistanz	Telearbeit („Home Office“, etc.)	-6 bis -7 % (bezogen auf Gesamtemissionen des Personenverkehrs)	Faber et al. (2012)
	Virtuelle Meetings	-6 % (bezogen auf Gesamtemissionen des Personenverkehrs)	
Ernährung			
Reduktion von tierischem Protein	1 fleischfreier Tag pro Woche	-8 % (bezogen auf ernährungsbedingte Emissionen)	Faber et al. (2012), Hallström et al. (2015); Poore/Nemecek (2018); Popp et al. (2010); Scarborough et al. (2014); Wirz et al. (2017)
	100 % vegetarische Ernährung	-40 % (bezogen auf ernährungsbedingte Emissionen)	
	100 % vegane Ernährung	-67 % (bezogen auf ernährungsbedingte Emissionen)	
Wohnen			
Absenkung der Raumtemperatur	um 1 °C	-5 % (bezogen auf Emissionen der Raumwärmebedarfsbereitstellung)	Faber et al. (2012)
	um 2 °C	-10 % (bezogen auf Emissionen der Raumwärmebedarfsbereitstellung)	Faber et al. (2012)
Optimierte Thermostat-Einstellungen		-3 % (bezogen auf Emissionen der Raumwärmebedarfsbereitstellung)	Faber et al. (2012)
Optimiertes Lüftungsverhalten		-12 % (bezogen auf Emissionen der Raumwärmebedarfsbereitstellung)	Faber et al. (2012)
Wohnflächenreduktion		Proportional zur Wohnflächenreduktion → potentiell großer Effekt	Fuhrhop (2015)

Im Bereich der **Mobilität** lassen sich Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen zuweilen schwer voneinander trennen. Auch der recht einfache Wechsel von einem Verbrenner- zu einem Elektrofahrzeug im Individualbesitz macht gewisse Verhaltensänderungen hinsichtlich des Tankens/Ladens und ggf. der Routenplanung notwendig, obwohl der bedeutsamere Aspekt hier die erhöhte Energieeffizienz der Technologie ist (neben der Tatsache, dass der Technologiewechsel die Nutzung erneuerbarer Energie ermöglicht bzw. vereinfacht). Sofern der Umstieg auf Elektroautos nicht als Suffizienzmaßnahme angesehen wird, liegen der Literatur zufolge die größten Energie- und CO₂-Einsparpotenziale beim Kauf und der Nutzung kleinerer Pkw, in der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel sowie in der Verringerung der Reisedistanz durch z. B. Telearbeit und „Virtuelle Meetings“.

Im Bereich der **Ernährung** liegen bedeutende Potenziale für die Senkung der THG-Emissionen durch Suffizienz. Ein besonders wichtiger Hebel ist dabei die Reduktion des Konsums (bzw. der dafür notwendigen Produktion) von *tierischen Produkten*.

Weltweit sind rund ein Viertel aller THG-Emissionen dem Lebensmittelsektor zuzuschreiben. (Diese Emissionen fallen vor allem in der Landwirtschaft an, entstehen zu einem geringeren Anteil aber auch beim Transport und der Verarbeitung der Lebensmittel.) Die Produktion von tierischen Produkten macht hierbei den Hauptanteil aus (Gilbert 2012; Poore/Nemecek 2018; Scarborough et al. 2014; Springmann et al. 2016; Thornton 2012; Vermeulen et al. 2012). Die in Deutschland unmittelbar durch die Landwirtschaft verursachten THG-Emissionen (inkl. landwirtschaftlicher Landnutzungsänderungen) belaufen sich auf rund 103 Mt CO₂-Äquivalent (UBA 2018), der Anteil der Tierhaltung daran beträgt ca. 28 Mt (Wirz et al. 2017; Wüstemann et al. 2017); allerdings sind hierbei weder die Vorkettenemissionen der importierten Futtermittel mit einbezogen noch die Emissionen, die durch den Transport und die Verarbeitung (Kochen etc.) der Lebensmittel entstehen.

Faber et al. (2012) schreiben einem Übergang zur vegetarischen Ernährung eine Reduktion um rund 40 % zu, während eine leichte Reduktion der Aufnahme von tierischen Proteinen (ein Tierprotein-freier Tag pro Woche) eine Reduktion um ca. 8 % bedeuten würde.¹² Andere Studien kommen zu ähnlichen Reduktionspotenzialen von ca. 1/3 der ernährungsbedingten THG-Emissionen durch vollständig vegetarische Ernährung und sogar ca. 2/3 bei rein pflanzenbasierter (veganer) Ernährung gegenüber der heutigen durchschnittlichen Ernährungsweise, und betonen das weiterreichende Reduktionspotenzial speziell von rein pflanzenbasierter, veganer Ernährungsweise (Hallström et al. 2015; Poore/Nemecek 2018; Popp et al. 2010; Scarborough et al. 2014) sowie den damit verbundenen positiven Effekten auf weitere planetare Grenzen wie Biodiversität, Landnutzungsänderungen, Frischwasserknappheit, Bodenversauerung und Eutrophierung (de Boer et al. 2016; Nijdam et al. 2012; Pachauri/Mayer 2015; Poore/Nemecek 2018; Tom et al. 2016), aber auch den positiven Effekten auf die menschliche Gesundheit (Springmann et al. 2016).

¹² Die Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE) ist in ihren Empfehlungen hinsichtlich des Gesundheitseffekts pflanzlicher Ernährung zumeist recht konservativ und empfiehlt derzeit eine reduziert fleischhaltige Diät (Deutsche Gesellschaft für Ernährung e. V. 2017), die aber dennoch insgesamt über den Ansatz eines tierproduktfreien Tages leicht hinausgeht. Zugleich zeichnet sich eine Entwicklung dahingehend ab, dass die DGE ihre traditionell skeptische Haltung gegenüber veganen Ernährungsweisen schrittweise aufgibt.

Darüber hinaus könnte eine deutliche Reduktion des Konsums tierischen Proteins neo-extraktivistische Praktiken des Futtermittelanbaus (Burchardt/Dietz 2014; Heinrich-Böll-Stiftung et al. 2018; Schlatzer 2013; Stoian/Henkemans 2000) und -imports u. a. aus Südamerika sowie tierethische Problematiken (Donaldson/Kymlicka 2013; Schmitz 2014) deutlich reduzieren. Die im „Kursbuch Agrarwende 2050“ (Wirz et al. 2017) skizzierte „Große Ernährungswende“ geht lediglich von einer Reduktion des deutschen Fleischkonsums von 50 % aus; was auf die unmittelbaren inländischen Emissionen bezogen (ohne Berücksichtigung der notwendigen Importe, d. h. der Vorkettenemissionen) gegenüber heute immerhin eine Reduktion um ca. 12 Mt CO₂-Äquivalent (17 % der THG-Emissionen der Landwirtschaft bzw. 1 bis 2 % der gesamten deutschen THG-Emissionen) bedeuten würde.

Bailey et al. (2014) stellen auf Basis von Befragungen darüber hinaus dar, dass die Produktion tierischen Proteins der allgemein am stärksten unterschätzte Bereich hinsichtlich ihres Klimaeinflusses im Vergleich zu anderen Sektoren wie z. B. der Stromerzeugung, Industrieprozessen, Entwaldung, Wohnungsheizungen oder Abfallentsorgung ist. Zugleich ist es aber auch derjenige Bereich, in welchem besonders große Bereitschaft zu Verhaltensänderungen bei entsprechender Aufklärung besteht. Ebenso besteht hier durchaus großes Potenzial für regulatorische und steuerliche Lenkung, die bei Erläuterung des ökologischen Nutzens auch große öffentliche Unterstützung erfahren kann. Bähr (2015) weist darauf hin, dass eine THG-gewichtete Fleischsteuer (als preisbeeinflussende top-down-Maßnahme) nach EU-Recht prinzipiell möglich sein dürfte.

Im Bereich des **Wohnens** bestehend die besonders einflussreichen Maßnahmen aus Flächenreduktion,¹³ einem (auf intelligente Weise) reduzierten Heizen und einer verbesserten Lüftungsstrategie. Mit fortschreitender energetischer Gebäudesanierung verringert sich hier jedoch das Reduktionspotenzial von Suffizienzmaßnahmen. Faber et al. (2012) listen drei Arten von Maßnahmen auf, von denen besonders die Reduktion der Raumtemperatur in der Heizperiode und ein optimiertes Lüftungsverhalten hervorzuheben sind. Diese Maßnahmen erfordern vorwiegend entsprechende Aufklärung und sind weitgehend ausschließlich auf der individuellen Ebene umsetzbar. Eine Steuerung über Heizkosten kann zwar möglicherweise unterstützend wirken, der wesentliche Hebel liegt aber in der Beförderung entsprechender Einstellungen.

3.5 Import von erneuerbar erzeugtem Strom und/oder auf dessen Basis erzeugten synthetischen Energieträgern

Wie in Abschnitt 2.2.5 besprochen, sehen die meisten der analysierten Klimaschuttszenarien Mitte des Jahrhunderts (Netto-) Importe von synthetischen Energieträgern und/oder Strom vor. Die entsprechenden Importe sind in den ambitionierteren -95 %-Szenarien tendenziell deutlich höher. In zwei der drei analysierten -95 %-Szenarien werden jährlich rund 1.200 bis 1.300 PJ an synthetischen Energieträgern aus dem Ausland importiert. Dies entspricht rund 20 bis 25 % des zukünfti-

¹³ Seit den Sechzigerjahren hat sich die Wohnfläche pro Person in Deutschland verdreifacht, von ca. 16 m² auf über 45 m² (Fuhrhop 2015). Sofern dieser Wachstumstrend fort dauert, erschwert er eine absolute Reduktion der durch die Raumwärme bedingten CO₂-Emissionen.

gen Endenergiebedarfs der jeweiligen Szenarien. In einem weiteren -95 %-Szenario („KS 95“) werden im Jahr 2050 hingegen deutlich weniger synthetische Energieträger und Strom (zusammen knapp 200 PJ/a) (netto) importiert.

Neben verschiedenen anderen Gründen (relativ niedriges Wirtschaftswachstum, starker Anstieg der Endenergieproduktivität und Einsatz von CCS in der Industrie) ist der geringere Importbedarf im Szenario „KS 95“ auf eine starke Nutzung der inländischen Erneuerbaren-Energien-Potenziale zurückzuführen. Insbesondere in ambitionierten Klimaschutzszenarien gibt es einen engen Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der zukünftigen Ausschöpfung der inländischen Erneuerbaren-Potenziale und dem Bedarf an Importen (weitgehend) CO₂-freier Energieträger – in Form von „grünem“ Strom, Wasserstoff oder synthetischen Energieträgern. In der Szenariostudie im Auftrag des BDI (Gerbert et al. 2018) wird auch explizit darauf hingewiesen, dass die technischen Potenziale der erneuerbaren Energien in Deutschland selbst im ambitioniertesten Klimaschutzszenario („95 %-Pfad“) nicht voll ausgeschöpft werden, da speziell in Bezug auf die Onshore-Windenergie Grenzen der gesellschaftlichen Akzeptanz angenommen werden.

Bezüglich der Akzeptanz wie auch der Naturverträglichkeit erscheint eine durch importierte Energieträger geminderte Nutzung insbesondere der Windenergie (Onshore und Offshore) und der Biomassenutzung vorteilhaft. Technisch und potenziellseitig steht einem Import von erneuerbar erzeugtem Strom bzw. daraus erzeugten synthetischen Energieträgern in Zukunft grundsätzlich nichts entgegen. Abgesehen davon, dass prinzipiell anzustreben ist, die grundsätzlich günstigen und besonders naturverträglichen Optionen „Effizienz“ und „Suffizienz“ möglichst weitgehend auszuschöpfen, stellt sich jedoch die Frage, ob bzw. in welchem Ausmaß es tatsächlich sinnvoll wäre, heimische Erneuerbaren-Potenziale ungenutzt zu lassen und stattdessen auf Importe von auf erneuerbaren Energien basierenden Energieträgern zu setzen. Bei der Beantwortung dieser Frage sollten mindestens die folgenden Aspekte beleuchtet werden:

- Wirtschaftlichkeit
- Politische und gesellschaftliche Realisierbarkeit
- Naturverträglichkeit

In Hinblick auf das Kriterium der **Wirtschaftlichkeit** ist festzuhalten, dass verschiedene modellgestützte Studien für Deutschland (u. a. SRU 2011, Dii 2012, Fraunhofer ISI et al. 2017) zu dem Ergebnis gekommen sind, dass bei einer zukünftig möglichen vollständigen (oder zumindest weitgehenden) Versorgung Deutschlands mit erneuerbar erzeugtem Strom ein gewisser Nettoimport von Strom aus dem europäischen Ausland und/oder aus der MENA-Region kostengünstiger wäre als eine vollständig auf heimischen erneuerbaren Energien beruhende Stromversorgung.

In Fraunhofer ISI et al. (2017) wird keine Austauschmöglichkeit mit der MENA-Region angenommen, dennoch wird im dortigen „Basisszenario“ (mit einer THG-Minderung von 80 % zwischen 1990 und 2050) Mitte des Jahrhunderts aus Kostengründen 15 % des deutschen Strombedarfs importiert. Ein großer Teil dieses importierten Stroms kommt in dieser Studie über Dänemark aus Windenergieanlagen in Skandinavien, ein weiterer großer Teil kommt über Frankreich und basiert auf Windenergieanlagen in Frankreich, Großbritannien und Irland sowie auf PV-Anlagen in Spanien und Portugal.

Die aufgrund der natürlichen Bedingungen günstigeren Stromerzeugungskosten von Windenergie- und Solaranlagen an vielen europäischen Standorten gegenüber typischen Standorten in Deutschland sprechen also für zukünftige Nettostromimporte aus dem Ausland. Mögliche zusätzliche Infrastrukturkosten, die beispielsweise durch zusätzliche Anforderungen an das Übertragungsnetz oder die Grenzkuppelstellen entstehen würden, sind – zumindest grob – in den modellbasierten Berechnungen der Literatur berücksichtigt und würden demnach gegenüber dem Kostenvorteil bei der Erzeugung keine wesentliche Bedeutung haben.

Eine ähnliche Feststellung bezüglich der ökonomischen Vorteilhaftigkeit lässt sich für den möglichen zukünftigen Import von synthetischen Energieträgern treffen, da deren Kosten wesentlich von den Kosten der Stromerzeugung abhängen. Weil der Import von synthetischen Energieträger nicht zwingend auf leitungsgebundene Infrastruktur (wie Pipelines oder – im Fall von Strom – Übertragungsnetze) angewiesen ist, sondern auch über Schiffe erfolgen kann, kommen für den Import dieser Energieträger grundsätzlich deutlich mehr Weltregionen in Frage als beim Stromimport. Fasihi et al. (2016) untersuchen, in welchen Weltregionen die Erzeugung flüssiger synthetischer Energieträger am kostengünstigsten wäre und finden – aus rein technisch-ökonomischer Sicht – unter anderem in Patagonien, in Somalia, im südlichen Tibet und im westlichen Australien besonders geeignete Standorte. Die Produktionskosten an solchen Standorten könnten auch unter Berücksichtigung der Transportkosten deutlich unterhalb der Produktionskosten entsprechender Energieträger in Deutschland liegen.

In Hinblick auf die politische und gesellschaftliche Realisierbarkeit ist es hingegen schwierig zu beurteilen, ob eine zukünftige Einschränkung bei der Nutzung der inländischen Erneuerbaren-Potenziale bei gleichzeitigem Import aus dem Ausland eine vorteilhafte Strategie darstellen würde. Auf der einen Seite würde ein Verzicht auf eine sehr weitgehende Ausschöpfung der inländischen Erneuerbaren-Potenziale grundsätzlich die Möglichkeit bieten, auf den Einsatz von Erneuerbaren-Anlagen mit besonders hohen Akzeptanzhürden zu verzichten. So könnte z. B. möglicherweise auf die Nutzung von Onshore-Windenergie in relativ dicht besiedelten oder in naturschutzfachlich oder landschaftlich besonders wertvollen Gebieten verzichtet werden. Dies könnte für die gesellschaftliche Realisierbarkeit einer ambitionierten Energiewende ein bedeutender Faktor sein.

Auf der anderen Seite erfordert der Import von Strom oder synthetischen Energieträgern den Ausbau von Erneuerbaren-Anlagen im Ausland sowie ggf. (beim Stromimport) einen länderübergreifenden Infrastrukturausbau. Ein solcher Ausbau von Anlagen und Infrastruktur könnte zum einen zu Akzeptanzproblemen in den betroffenen Ländern führen und erfordert zum anderen eine starke Zusammenarbeit über Ländergrenzen und evtl. sogar Kontinente hinweg, die u. a. auf ein Mindestmaß an politischer Stabilität angewiesen wäre. Die politischen Entwicklungen der letzten Jahre in vielen nordafrikanischen Ländern bzw. die weltweit aktuell vielfach diagnostizierte „Krise des Multilateralismus“ könnte Zweifel daran nähren, dass in den kommenden Jahren und Jahrzehnten die Bedingungen für einen starken Import von Energieträgern auf Basis erneuerbarer Energien erfüllt sein werden.

Dabei ist allerdings zu beachten, dass der innereuropäische (Netto-) Import von Strom aus politischer Sicht kein Problem darstellen sollte, während der Import von synthetischen Energieträgern aus dem außereuropäischen Ausland bezüglich der Akzeptanz (keine Notwendigkeit ausgedehnter Netzinfrastruktur) und der politischen Realisierbarkeit (gesonderte Abstimmungen mit einzelnen Ländern möglich, keine Vielzahl an Ländern betroffen wie bei ausgedehntem Stromnetzneubau) gegenüber dem Import von Strom aus dem außereuropäischen Ausland weniger problematisch sein dürfte. Nicht zuletzt aufgrund dieser Überlegungen setzen aktuelle ambitionierte Klimaschutzszenarien für Deutschland deutlich stärker auf den Import von synthetischen Energieträgern aus anderen Weltregionen als auf einen – vor einigen Jahren in Klimaschutzszenarien noch vielfach unterstellen – Stromimport aus der MENA-Region. Ein entsprechender Import synthetischer Energieträger aus politisch ausreichend stabilen Regionen mit günstigen Erneuerbaren-Bedingungen bei gleichzeitigem Nettoimport aus kostengünstigen Erneuerbaren-Regionen innerhalb Europas (z. B. Skandinavien und Südeuropa) könnte also eine aus Sicht der politischen und gesellschaftlichen Realisierbarkeit praktikable Kombination darstellen.

In Hinblick auf die Naturverträglichkeit ist ebenfalls keine klare Aussage hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit einer Importstrategie möglich. Auf der einen Seite ließe sich auch hier argumentieren, dass es ein gewisser Import von Strom oder auf Basis von Strom erzeugten Energieträgern erlauben würde, auf den Ausbau von naturschutzfachlich besonders problematischen Erneuerbaren-Anlagen in Deutschland zu verzichten. Auf der anderen Seite müssten entsprechende Anlagen und Infrastrukturen (v. a.) im Ausland errichtet werden, die ebenfalls mit relevanten Einflüssen auf den Naturschutz verbunden sein können. Dabei kann jedoch argumentiert werden, dass die besseren natürlichen Bedingungen an guten Erneuerbaren-Standorten im Ausland höhere Volllaststunden und damit weniger Anlagen pro erzeugter kWh Strom als in Deutschland erlauben. Dies dürfte einen positiven Effekt einer solchen „Substitutionsstrategie“ darstellen.

Für eine genauere Beantwortung der Frage nach den Auswirkungen auf die Naturverträglichkeit einer Importstrategie (gegenüber einer Strategie, die auf eine Maximierung der Nutzung erneuerbarer Energien im Inland setzt) müssten die in Frage kommenden Standorte und die dort eingesetzten Technologien für die Erzeugung von erneuerbarem Strom und/oder synthetischen Energieträgern genauer betrachtet werden. Relevante Fragen wären dabei: Handelt es sich um ökologisch sensible Regionen? Inwieweit wirkt sich Bau und Betrieb der Anlagen auf die lokale Flora und Fauna aus? Sind Zugvögel durch die Anlagen betroffen? Wie relevant sind die Naturschutz-Wirkungen der benötigten Infrastruktur, z. B. der benötigten Übertragungsnetze, Pipelines, Umwandlungsanlagen und möglicherweise ausgelöster Schiffverkehre.

Aufgrund des erwähnten Vorteils der höheren Volllaststunden sowie der global in großer Anzahl in Frage kommenden Regionen erscheint die Annahme plausibel, dass ein positiver Nettoeffekt einer Importstrategie auf die Naturverträglichkeit möglich ist, sofern die Standorte im Ausland und das dortige Anlagendesign sorgfältig in Hinblick auf Naturverträglichkeit geprüft werden und im Inland dafür z. B. auf Anbaubiomasse und/oder die Nutzung naturschutzfachlich besonders problematischer Windstandorte verzichtet wird (und nicht z. B. der Ausbau von PV-Dachanlagen re-

duziert wird). Studien, die in den für einen Export besonders in Frage kommenden Regionen die Naturverträglichkeit entsprechender Erzeugungsanlagen untersuchen und im Idealfall auch mit der Naturverträglichkeit zusätzlicher Erneuerbarer-Anlagen in Deutschland bzw. Europa vergleichen, sind uns nicht bekannt. Es wäre wünschenswert, wenn entsprechende Studien in Zukunft durchgeführt würden.

3.6 Einsatz von CCS im Industriesektor zur Reduktion des Strombedarfs

Durch das Auftreten prozessbedingter Emissionen, den hohen Endenergiebedarf vor allem der Grundstoff-Industrie (inkl. einer hohen Nachfrage nach Hochtemperaturwärme) sowie das im Vergleich zum Gebäudesektor begrenzte Effizienzpotenzial stellt eine weitgehende THG-Emissionsminderung im Industriesektor eine besondere Herausforderung dar. Die Verdrängung fossiler Energieträger durch den Einsatz erneuerbarer Energien insbesondere in Form von Strom und auf Strom basierenden Energieträgern ist zwar grundsätzlich auch im Industriesektor möglich, für eine weitgehende bzw. vollständige THG-Minderung wäre eine solche Strategie aber selbst im Falle von optimistischen Effizienzfortschritten auf sehr große Mengen erneuerbarer Stromerzeugung angewiesen.

Nicht zuletzt aus diesem Grund wird in den meisten aktuellen ambitionierten Klimaschutzszenarien zur Minderung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors auch CCS-Technologie eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.2.6). Aus den analysierten sowie anderen vorliegenden Energieszenarien lässt sich nicht präzise bestimmen, inwieweit ein breiter Einsatz von CCS in der Industrie gegenüber einer zu ähnlichen CO₂-Emissionsreduktionen führende Elektrifizierung der Industrieprozesse zu Einsparungen beim Strombedarf führen würde. Für eine (grobe) Quantifizierung dieser potenziellen Stromeinsparungen wird daher auf interne Berechnungen des Wuppertal Instituts zurückgegriffen. Durch diese Quantifizierung soll eine Vorstellung gewonnen werden, wie stark sich ungefähr der Ausbaubedarf erneuerbarer Stromerzeugung (ob in Deutschland oder – im Falle von Importen – im Ausland) durch einen starken Industrie-CCS-Einsatz reduzieren ließe.

Für die folgenden Berechnungen konzentrieren wir uns auf die Stahl- und Zementherstellung, da in diesen Branchen bei weitem die größten CO₂-Einsparpotenziale durch den Einsatz von CCS gesehen werden. Die folgende Tabelle 11 berechnet die mögliche Stromeinsparung im Falle des Einsatzes von CCS. Dafür werden zunächst mögliche Produktionsmengen in Deutschland im Jahr 2050 unterstellt, die aus Repenning et al. (2015) entnommen wurden. Des weiteren wird für beide Branchen der jeweils erwartete spezifische Strombedarf für die Stahl- bzw. Zementklinkerherstellung im Jahr 2050 im Falle des Einsatzes von CCS sowie im Falle einer auf Strom umgestellten Produktion (Direktreduktion mit Wasserstoff im Falle des Stahls und Elektroofen im Falle der Zementklinkerherstellung) angegeben. Im Falle der Stahl-Direktreduktion ist in dem Strombedarf auch der indirekte Strombedarf durch den hohen Wasserstoffbedarf enthalten, wobei eine Umwandlungseffizienz von Strom zu Wasserstoff von 80 % unterstellt wurde. Auf dieser Grundlage lässt sich der Strombedarf für beide Branchen im Jahr 2050 in den beiden unterschiedenen Fällen ermitteln. Demnach ergibt sich für eine weitgehend dekarbonisierte Stahl- und Zementherstellung bei einem breiten Einsatz von CCS gegenüber dem denkbaren alternativen Pfad ein Stromeinsparpotenzial in Höhe von jährlich 126 TWh.

Tabelle 11: Stromeinsparpotenzial im Jahr 2050 in der Stahl- und Zementindustrie durch einen breiten CCS-Einsatz (gegenüber Dekarbonisierung über Elektrifizierung und H₂-Einsatz)

	Produktionsmenge (in kt/a)	Spezifischer Strombedarf (in MWh/t)		Gesamtstrombedarf (in TWh/a)		Stromeinsparpotenzial der CCS-Route (in TWh/a)
		Strom-Route	CCS-Route	Strom-Route	CCS-Route	
Stahlherstellung	19.343	6,4	0,3	123,7	6,4	117,3
Zementklinkerherstellung	14.289	1,0	0,4	14,7	6,0	8,7
SUMME						126

Quellen: Repenning et al. (2015) für die Produktionsmengen und eigene Annahmen für den spezifischen Strombedarf.

Unter der (vereinfachten) Annahme, dass dieser Strombedarf – ob in Deutschland oder im Ausland – durch Onshore-Windenergieanlagen (mit VLS von 2.500) bereitgestellt werden würde, so entspräche diese Einsparung einer Minderung der Onshore-Anlagenkapazität in Höhe von rund 50 GW. Dies wiederum wären knapp 17.000 Anlagen der 3 MW-Klasse oder 10.000 Anlagen der 5 MW-Klasse.

Da CCS grundsätzlich auch in weiteren industriellen Bereichen eingesetzt werden könnte (v. a. in Raffinerien und – branchenübergreifend – bei der industriellen Strom- und Wärmeerzeugung), für die ebenfalls strombasierte Alternativlösungen denkbar sind, ist das insgesamt realisierbare Stromeinsparpotenzial durch CCS noch höher als in Tabelle 11 angegeben. Es ist für diese weiteren Bereiche allerdings schwerer zu bestimmen als für die Stahl- und Zementherstellung. Zudem ist zu bedenken, dass hier zwei extreme alternative Routen (weitgehender CCS-Einsatz gegenüber rein strombasierter CO₂-Minderung) gegenübergestellt wurden. Durchaus denkbar ist es, dass es in Zukunft zu einer Mischung dieser beiden Strategien kommen wird.

Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass zwar der Bedarf an erneuerbarer Stromerzeugung durch den Einsatz von CCS (deutlich) reduziert werden kann, dass aber der CCS-Einsatz auch mit Nachteilen verbunden ist, nicht zuletzt infolge des Bedarfs an fossilen Energieträgern, deren Förderung und Transport negative Einflüsse auf Ökosysteme hat und deren Verbrennung zu gesundheitsschädlichen Emissionen führt – schließlich können durch CCS „nur“ die CO₂-Emissionen (weitgehend), nicht jedoch lokal wirksame Luftschadstoffe abgeschieden werden. Zudem ist ungewiss, ob ein breiter Einsatz von CCS im Industriesektor auf ausreichend gesellschaftliche Akzeptanz stoßen würde bzw. ob die Akzeptanz für diese Technologie höher wäre als für den alternativen Pfad der Elektrifizierung der Industrieprozesse (inkl. der zusätzlichen Erneuerbaren-Erzeugung). Schließlich ist zu erwähnen, dass die erreichbaren CO₂-Minderungen im Falle einer Elektrifizierungs-Route vermutlich höher wären als in einer CCS-Route, denn durch CCS können nicht 100 % der entstehenden CO₂-Emissionen abgeschieden und gespeichert werden.

3.7 Förderung natürlicher Senken

Es wird erwartet, dass der Rückgang der THG-Aufnahmefähigkeit der natürlichen Senken in den kommenden Jahrzehnten zu einem bedeutenden Treiber des globalen Klimawandels werden wird (Steffen et al. 2018) und entsprechend einer erhöhten Aufmerksamkeit bedarf. Auch im hochindustrialisierten Deutschland sind diese Senken von einiger Relevanz für die Netto-THG-Bilanz. So verursacht die landwirtschaftliche Nutzung von organischen Böden als Acker- und Grünland derzeit pro Jahr CO₂-äquivalente Emissionen in Höhe von rund 38 Millionen Tonnen (UBA 2018).

Die landwirtschaftlich genutzten Flächen haben eine direkte Klimarelevanz durch den Humusverlust und die damit einhergehenden CO₂- und CH₄-Emissionen. Diese werden vorwiegend durch (v. a. konventionellen) Ackerbau, Entwaldung und Trockenlegungen verursacht – besonders Moore sind in diesem Zusammenhang als bedeutende Kohlenstoffspeicher zu nennen, die bei Trockenlegung große Mengen an Treibhausgasen freisetzen und nur durch Wiedervernässung stabilisiert werden können. Je nach Studie wird die historisch durch den Menschen verursachte kumulierte Menge emittierten Kohlendioxids durch Humusverlust global als ähnlich groß oder gar größer als diejenige aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe angenommen (Pachauri/Mayer 2015; Sanderman et al. 2017). Diese Betrachtung birgt allerdings nicht nur die nachdrückliche Warnung vor weiteren klimaschädigenden Humusverlusten der Böden, vor denen auch der Weltagrarbericht und auch schon deutlich früher der WBGU nachdrücklich warnten (McIntyre 2009; WBGU 1995), sondern zeigt auch einen möglichen Weg für Klimaschutz und negative THG-Emissionen auf. Die historisch dokumentierten Humusgehalte der Böden sind durch entsprechend angepasste und konsequent umgesetzte Praktiken langfristig grundsätzlich wieder herstellbar (Löwenstein 2011; Ministry of agriculture, agrifood and forestry, France 2015; Rhodes 2015; Treuer et al. 2017).

Des weiteren verursacht die Eutrophierung der Böden durch reaktiven Stickstoff aus Kunstdünger und Tierfäkalien starke Schädigungen sowohl der landbasierten als auch der maritimen THG-Senken (Galloway et al. 2008; IPCC 2013; Meter et al. 2018; Notarnicola et al. 2017; Sobota et al. 2015). Unter anderem hat sich in der Ostsee eine große und weiterhin wachsende Sauerstoff-verarmte Zone ausgebildet, die unmittelbar auf diese Stoffströme zurückzuführen ist (Carstensen et al. 2014) und die Fähigkeit dieses Gewässers zur CO₂-Aufnahme und zum CO₂-Abbau stark beeinträchtigt. Solche Zonen können sich wiederum klimawandelbedingt durch veränderte Regenmengen stark vergrößern, sofern die entsprechenden Inputs reaktiven Stickstoffs nicht deutlich reduziert werden (Seitzinger/Phillips 2017; Sinha et al. 2017). Ein Schlüssel zur Abhilfe ist die Vermeidung und Reform besonders schädigender landwirtschaftlicher Praktiken (Wüstemann et al. 2017), zu denen u. a. auch der Kunstdünger-gestützte Biomasse-Intensivanbau gehört.

Sowohl der derzeitige Anbau von energetisch genutzter Biomasse als auch der Futtermittelanbau gehen mit Netto-THG-Emissionen und der Beeinträchtigung von THG-Senken einher. Sofern eine weitere (konventionelle) landwirtschaftliche Intensivnutzung der Flächen praktiziert wird, ist der Anbau von Biomasse zur Energiegewinnung (z. B. von Mais) hinsichtlich der Treibhausgasbilanz und weiterer ökologischer Auswirkungen immer noch günstiger als der Anbau von Futtermitteln (z. B.

ebenfalls Mais) für eine intensive, industrielle Tierhaltung. Während im ersteren Fall die THG-Emissionen nahezu ausschließlich während des Anbaus der Pflanzen und in der Vorkette (Kunstdüngererzeugung, Treibstoff für die Landmaschinen, Landnutzungsänderungen) auftreten, kommen im Bereich der Viehproduktion zusätzlich noch die direkten Methan-Emissionen der Tierbestände sowie die (ebenfalls mit Methanemissionen verbundene, aber eben auch stark THG-Senken-beeinträchtigende) Problematik der tierischen Exkremente hinzu. Sowohl für die menschliche Ernährung als auch für die Energiegewinnung ist die direkte pflanzliche Nutzung (pflanzenbasierte Lebensmittelproduktion bzw. direkte pflanzliche Biomassenutzung) wesentlich verlustärmer als der Umweg über die Tiermast.¹⁴ Insofern ist die „Tank oder Teller“-Rahmung der Kritik an Biomasse eine sehr verkürzte Darstellung, die um die Dimension „Stall“ erweitert werden sollte.

Zuweilen artikulierte Hoffnungen, durch intelligente Weidewirtschaft wie etwa das „holistische Beweiden“ zu deutlich reduzierten oder gar negativen Netto-THG-Emissionen zu gelangen (Idel 2016; Savory 2013) scheinen einer kritischen wissenschaftlichen Bestandsaufnahme nicht standzuhalten (Garnett et al. 2017; Nordborg 2016). Lediglich extensive Weidehaltung mit sehr geringen, unter aktuellen Bedingungen in Europa unwirtschaftlichen Tierbestandsdichten erscheint ein klimatisch vertretbarer Weg, erfordert allerdings sehr ausgedehnte Flächen, die der alternativen Renaturierung entzogen würden und damit im Vergleich eine schlechtere Klima- und Biodiversitätsbilanz aufweisen als renaturierte Gebiete (Capper 2011; Erb et al. 2017). Nur zum Erhalt spezifischer, jedoch durchaus sehr bedeutsamer Ökosysteme wie Heidelandschaften, Magerwiesen und anderer „hochwertiger Graslandschaften“ (Wüstemann et al. 2017) kann ein (sehr geringer) Bestand an frei weidenden Wiederkäuern ökologisch sinnvoll sein.

Tabelle 12 gibt eine vergleichende Übersicht der verschiedenen Flächennutzungsoptionen und der jeweiligen THG-Emissionen bzw. Aufnahmen. Die Berechnungen basieren auf der Quellen- und Senkenleistung der jeweiligen Flächennutzung. Durch Renaturierung können dabei typischerweise deutlich mehr THG-Emissionen vermieden bzw. negative Emissionen erreicht werden als durch einen Wechsel zwischen verschiedenen Arten der Bewirtschaftung. *„Damit zeigt sich deutlich, dass mit einer Umwandlung von Ackerflächen auf organischen Böden hin zu Wald, Feuchtgebieten oder Gehölzen eine zwei- bis dreifach höhere THG-Reduktion erreicht werden kann als mit dem Anbau von Bioenergie.“* (Repenning et al. 2015 S. 366)

¹⁴ Die Konversionsraten verschiedener Spezies liegen für energiereiches, organisches Material zwischen ca. 2:1 bei Insekten und manchen Fischen und 5:1 bis 10:1 bei Schweinen und Rindern (Heinrich-Böll-Stiftung et al. 2018; Smith et al. 2014). Der Großteil der in den Pflanzen enthaltenen Energie geht also verloren und steht nicht der menschlichen Ernährung zur Verfügung. Ebenso ist lediglich ein Bruchteil der in den Pflanzen ursprünglich enthaltenen Energie in den teilweise in Biogasanlagen weiter genutzten tierischen Exkrementen enthalten. Allerdings wird z. B. in der Weidehaltung auch pflanzliche Biomasse genutzt, die direkt nicht zur menschlichen Ernährung geeignet wäre.

Tabelle 12: THG-Reduktionspotenziale bei der Umwandlung von Ackerland auf organischen Böden hin zu Wald, Feuchtgebieten oder Gehölzen und bei der Produktion von Bioenergie

Flächenkategorie	Jährliche Emissionen in t CO ₂ -äq/ha	Jährliche Einsparung in t CO ₂ -äq/ha
Vor Umwandlung		
Altes Ackerland (org. Böden)	40	0
Die ersten 20 Jahre nach Umwandlung		
Altes Ackerland (org. Böden) zu neuem Wald (org. Böden)	-10 bis -14	-54
Altes Ackerland (org. Böden) zu neuen Feuchtgebieten (org. Böden)	-2,2	-43
Altes Ackerland (org. Böden) zu neuem Gehölz (org. Böden)	-2,9	-43
Ab dem 21. Jahr nach Umwandlung		
Alter bzw. der Pionierphase entwachsener Wald (org. Böden)	1 bis -17	-40 bis -57
Alte Feuchtgebiete (org. Böden) ohne Torfabbau	-2,2	-43
Alte Gehölze (org. Böden)	2,5	-38
Bioenergie		
Bioenergie vom Acker (WBGU 2009)	Keine Angabe	-4 bis -23

Quellen: Repenning et al. 2015, Wüstemann et al. 2107.

Die **Vermeidung von Futtermittel- und Biomasseanbau verbunden mit einer Renaturierung** ist somit der weit bessere Klimaschutz (WBGU 2009) als die Substitution anderer Energieerzeugung durch mittels konventioneller Landwirtschaftspraktiken bereitgestellter Bioenergie. Lediglich eine gezielt auf den Aufbau von Dauerhumus ausgerichtete landwirtschaftliche Praxis (s. unten) kann hier ggf. eine Veränderung in der Gesamtbilanz bewirken und vergleichbare THG-Reduktionen erreichen wie sie bei Renaturierung erreicht werden.

Der von Hartje et al. (2015) beworbene Anbau erneuerbarer Energieträger auf wiedervernässten Moorböden („Paludikultur“) könnte hier für spezifische Teilbereiche sowohl hinsichtlich der jährlichen Flächenausbeute als auch hinsichtlich der THG-Emissionsbilanz eine gangbare Erzeugungsoption für Biomasse darstellen. Um diese zu befördern, müsste allerdings die derzeitige, den Biomasseanbau auch auf trockengelegten Moorböden unterstützende Subventionsstruktur entsprechend angepasst werden. Da das Gesamtpotenzial zur Biomasseerzeugung mittels dieser Praktiken allerdings aufgrund der begrenzt zur Verfügung stehenden (potenziellen) Feuchtflächen vergleichsweise gering ist, dürfte sich hierdurch für die oben diskutierte Gesamtverfügbarkeit von Biomasse keine signifikante Änderung ergeben. Weiteren Methoden wie die des Wildpflanzen-Mischanbaus, der Reststoffbiomasse-Fermentation und des potenziell weitgehend naturverträglich zu gestaltenden Anbaus von Kurzumtriebsplantagen (Wüstemann et al. 2017) können allesamt Beiträge leisten, ihr Potenzial ist derzeit allerdings schwer abzuschätzen. Im Zug einer umfassenden Agrarwende (McIntyre 2009; Wirz et al. 2017) und einer Abkehr von industrieller Tierhaltung mit dem damit verbundenen Futtermittelanbau könnten hierfür aber relevante Flächen verfügbar werden.

Der **Schutz und die Wieder-Ausweitung von Überflutungsflächen** stellt ebenfalls eine wichtige Klimaschutzmaßnahme dar, da in diesen Flächen allein in Deutschland ca. 550 Mt CO₂-Äquivalent gespeichert sind (Scholz 2012). Diese Kohlenstoffvorräte können nur erhalten und potenziell erhöht werden, wenn sich die Überschwemmungsgebiete in naturnahen hydrologischen Bedingungen befinden, die ein angepasstes Landmanagement erfordern, oder wenn sie naturnah erschlossen werden. Darüber hinaus haben Berechnungen ergeben, dass die landwirtschaftliche Nutzung von Mooren in morphologischen Überschwemmungsgebieten für jährliche Emissionen von rund 2,5 Mio. t CO₂-Äquivalent verantwortlich ist (ebd.). Entsprechend ist die Sicherung dieser Moore (d. h. eine Verhinderung ihrer landwirtschaftlichen Nutzung) von besonderer Bedeutung.

Der **Schutz weiterer Ökosysteme** mit besonders hohem Kohlenstoffsinkenpotenzial wie Moore, Wälder, Auen und Grasland ("no net loss principle") bildet den Eckpfeiler einer ökosystemorientierten Klimaschutzpolitik, die starke Synergien mit Biodiversitätszielen schafft. Dies kann kosteneffiziente Klimaschutzstrategien darstellen. Wie Wüstemann et al. (2017) betonen, fehlt es mit Ausnahme der Wald- und Auenökosysteme in den meisten Bundesländern an ausreichenden Zielen und Instrumenten zum Schutz von Ökosystemen mit hohem Kohlenstoffsinkenpotenzial. Insbesondere der Schutz humusreicher Böden und Moore durch Konservierung, Wiedervernässung und nachhaltige Nutzung gehört zu den wirksamsten Maßnahmen zur Vermeidung erheblicher THG-Emissionen, denn diese Böden bilden auf nur 8 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche den größten terrestrischen Kohlenstoffspeicher Deutschlands.

Wie zuvor erwähnt, ist der Trend des Humusverlusts und damit einhergehender THG-Emissionen prinzipiell umkehrbar und ein **Humusaufbau** möglich, wofür u. a. die internationale 4‰-Initiative wirbt (Rhodes 2015). Hierbei ist die Bildung von langfristig stabilem sogenannten „Dauerhumus“ entscheidend.

Wald kann in dieser Hinsicht nur dann als langfristige Senke erachtet werden, wenn er langfristig erhalten bleibt (so dass die Gesamtheit der lebenden Bäume einen langfristig stabilen Kohlenstoffspeicher darstellen kann) und der Aufbau von Dauerhumus erfolgt (Baccini et al. 2017; Idel 2016). In Deutschland scheint zumindest auf der kurzfristigen Zeitskala das aktuelle Forstmanagement den maximal möglichen Sequestrierungsraten zumindest hinsichtlich der Größenordnung nahe zu kommen (Wüstemann et al. 2017); hier besteht eine Herausforderung darin, diesen Status langfristig abzusichern und eine weitere darin, das verbleibende Optimierungspotenzial auszuschöpfen. Durch die Nutzung von Brennholz (vor allem in privaten Haushalten) werden derzeit relevante Mengen Kohlenstoff wieder verbrannt. So schwankte der Brennholzverbrauch zwischen 2010 und 2014 um einen Wert von ca. 30 Mio. Festmeter, wovon der Großteil aus Waldscheitholz bestand (Mantau et al. 2018).

Im Ackerbau und der Nahrungsmittelproduktion ist besonders das große Potenzial der regenerierenden Landwirtschaft¹⁵ von Bedeutung (McIntyre 2009; leicht zugänglich dargestellt in Löwenstein 2011).

¹⁵ Eine „regenerative“ Landwirtschaft zielt auf Maßnahmen ab, die implizit die Regeneration von Böden, Wäldern, Gewässern und der Atmosphäre vorantreiben (Sherwood/Uphoff 2000). Sie bedient sich unter anderem den vier Prinzipien der konser-

Eine besonders vielversprechende Technik scheint die in den letzten Jahren wiederentdeckte Herstellung von sogenannter Terra Preta zu sein, die auf weitgehend in Vergessenheit geratene jahrtausendealte Kulturtechniken von den südamerikanischen Regenwald bewohnenden Volksgruppen zurückgeht (eine Einführung inkl. Case Studies bietet Pfützner 2018). Hierbei wird anfallende Biomasse im Zuge der Kompostierung mit Pflanzenkohle versetzt, die dauerhaft (potenziell über Jahrhunderte hin) erhalten bleibt und dank ihrer großen Oberfläche und des dadurch sehr großen Absorptionsvermögens Feuchtigkeit und diverse Nährstoffe speichern und Mikroorganismen eine förderliche Umgebung bieten kann. Bisherige Studien belegen das Potenzial von Terra Preta sowohl zur Kohlenstoffeinspeicherung im Boden und der dauerhaften Humusbildung, als auch zur deutlichen Reduktion von bis hin zum völligen Verzicht auf synthetische Dünger.

Pflanzenkohle kann gemäß der European Biochar Foundation aus einer Vielzahl von Ausgangsstoffen gewonnen werden, sofern entsprechende Qualitätsstandards eingehalten werden (s. auch Ullum 2017). Hierzu zählen neben Grüngut und Holz(resten) auch Rückstände wie Schalen aus der Nahrungsmittelproduktion, tierische Nebenprodukte wie Borsten und Federn, aber auch Gärreste aus Biogasanlagen und Faserschlamm aus der Papierherstellung.

Bei der Herstellung von Pflanzenkohle für Terra Preta wird etwa die Hälfte des im Ausgangsmaterial vorhandenen Kohlenstoffs zu im Boden dann dauerhaft stabiler Pflanzenkohle umgewandelt, während bei gewöhnlicher Kompostierung der überwiegende Teil des Kohlenstoffs langfristig wieder in CO₂ umgewandelt wird und nur ein geringer Anteil dem Aufbau von Dauerhumus dient.

Die Herstellung von Pflanzenkohle erfolgt gegenwärtig häufig in offenen Systemen unter freiem Himmel. Ökologisch sinnvoller ist die Nutzung in speziell darauf ausgelegten Anlagen, die eine optimale Energienutzung und Abgasnachbehandlung gewährleisten. Dies unterbindet weitgehend die Emission von Kohlenmonoxid, Stickoxiden und Feinstaub. Daneben ist eine gleichbleibend hohe Produktqualität erreichbar. Ebenso können solche größeren Anlagen weitgehend kontinuierlich betrieben werden, wodurch sowohl die Anlagenauslastung als auch die Energieeffizienz wesentlich gesteigert werden. In dieser Weise bietet die Pflanzenkohleherstellung eine attraktive, bislang noch wenig genutzte Bewirtschaftungsoption u. a. für (miteinander kooperierende) Bauernhöfe und städtische Entsorgungsbetriebe.

Eine Abschätzung (basierend auf ÖI et al. 2004) ergibt ein technisches Potenzial von mindestens 28 Mt Kohle/Jahr, was einer Einspeicherung von rund 100 Mt CO₂/Jahr entspricht.¹⁶ Hierbei wurde der Großteil der in der land- und forstwirtschaftlichen

vierenden Landwirtschaft, geht über diese aber in verschiedener Weise noch hinaus: (1) Belassen von Pflanzenrückständen auf dem Boden als Mulch; (2) Einbeziehen von Zwischenfrüchten in den Gesamtproduktionszyklus; (3) Verwenden eines integrierten Nährstoffmanagements zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, zur Förderung des gesunden Pflanzenwachstums und der biochemischen Umwandlung von Kohlenstoff aus Biomasse in Humus; und (4) Minimierung bis Vermeidung (pflugloses Wirtschaften) der Störung des Bodens. Diesen Praktiken wird großes Potenzial für Klima- und Umweltschutz (Humphries/Brazier 2018) sowie die Ernährungssouveränität (Löwenstein 2011) sowohl in Entwicklungsländern als auch in industrialisierten Ländern zugeschrieben.

¹⁶ Hiermit könnte die deutsche Landwirtschaft theoretisch in ihrer Gesamtheit eine ausgeglichene THG-Bilanz erreichen (aktueller THG-Ausstoß der Landwirtschaft innerhalb Deutschlands inkl. landwirtschaftlicher Landnutzungsänderungen: rund 103 Mt CO₂-Äquivalent (UBA 2018); deutscher Gesamt-THG-Ausstoß aller Sektoren: rund 900 Mt)

Produktion anfallenden pflanzlichen Reststoffbiomasse als Quelle angenommen, was sicherlich nur schwer – falls überhaupt – erreichbar ist. Bei einem geringeren Anteil (z. B. zwischen 10 und 50 %) verringert sich das Gesamtpotenzial entsprechend. Sofern die erzeugte Pflanzenkohle den jeweiligen Bereichen wieder zugeführt wird, resultiert diese Entnahme nicht in einer durch synthetische Düngemittel zu kompensierenden Verarmung der Böden, wie dies bei derzeitiger Nutzung der Reststoffbiomasse in verschiedenen Bereichen (z. B. im Wald) der Fall ist. Hierbei wirkt die Pflanzenkohle nicht selbst als Dünger, erhöht allerdings die Speicherfähigkeit der Böden für Wasser und Nährstoffe und dient als Substrat, auf dem sich (Nährstoffe bereitstellende) Mikroorganismen verstärkt ansiedeln können. Eine detaillierte Darstellung der Abschätzung ist im Anhang D zu finden.

Diese Abschätzung ist noch mit vergleichsweise großen Unsicherheiten behaftet und diverse Trade-Offs müssen analysiert und mit eingerechnet werden. Zudem liegt das wirtschaftlich realisierbare Potenzial sicherlich unter diesem grob abgeschätzten technischen Potenzial, und der Aufbau von entsprechenden Erzeugungskapazitäten sowie die Umstellung von aktuellen wirtschaftlichen Praktiken würde einige Jahre bis Jahrzehnte erfordern. Als vielversprechende Klimaschutzoption verdient diese Praxis sicherlich einer weitergehenden Betrachtung.

3.8 Kreislaufwirtschaft und Materialsubstitution

Eine in den letzten Jahren zunehmend diskutierte Strategie für den Klimaschutz ist die Transformation unserer aktuell überwiegend linearen Produktions- und Konsummuster hin zu einer Kreislaufwirtschaft, bei der die in Produkten und ihren Komponenten enthaltene Energie und natürliche Ressourcen am Ende ihrer Nutzungsphase möglichst optimal erhalten bleiben. Ansätze zur Schließung von Kreisläufen ergeben sich dabei nicht nur auf der Angebotsseite – durch eine Erhöhung der Recycling-Raten beispielsweise bei Stahl, Aluminium und Kunststoffen – sondern auch auf der Nachfrageseite, indem zirkuläre Geschäftsmodelle vorangetrieben werden („Teilen statt Haben“).¹⁷

Die Europäische Kommission (2015) hat zum Thema Kreislaufwirtschaft im Jahr 2015 einen Aktionsplan vorgelegt, der neben den möglichen Beiträgen zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie auch die Chancen für den Klimaschutz betont: „Die Maßnahmen zur Schaffung der Kreislaufwirtschaft gehen daher einher mit den Hauptaktionsprioritäten der EU, die unter anderem Themen wie Beschäftigung und Wachstum, Investitionsagenda, Klima und Energie, sozialpolitische Agenda und industrielle Innovation betreffen, sowie mit den weltweiten Bemühungen um eine nachhaltige Entwicklung.“

Die produzierende Industrie steht Ansätzen der Kreislaufwirtschaft derzeit tendenziell skeptisch gegenüber, u. a. weil sie in Hinblick auf einige wiederaufbereitete Materialien Qualitätseinbußen befürchtet. Außerdem erscheint eine mit einer Erhöhung der Recycling-Anteile einhergehende Minderung der primären Produktionsmengen für große Teile der Industrie per se nicht attraktiv. Die internationale Vermaschung und der starke Wettbewerb der (Grundstoff-) Industrie erschweren die notwendigen

¹⁷ Zwischen den Ansätzen der Kreislaufwirtschaft und denen der Suffizienz bestehen hier Überschneidungen.

strukturellen Veränderungen, dementsprechend ist hier vorwiegend eine gut abgestimmte, in Dialog sowohl mit Umweltverbänden als auch mit den betroffenen Industriebranchen entwickelte rahmensetzende Wirtschaftspolitik vonnöten.

Grundsätzlich wird das Klimaschutzpotenzial einer Kreislaufwirtschaft als groß eingeschätzt. So kommt beispielsweise eine aktuelle Studie von Material Economics (Enkvist/Klevnäs 2018) zu dem Ergebnis, dass die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft rund 50 % der THG-Emissionen der Grundstoffindustrie vermeiden könnte. Dieses Klimaschutzpotenzial kann allerdings aufgrund der dafür notwendigen tiefgreifenden strukturellen Änderungen bei der industriellen Produktion und dem Konsumverhalten erst längerfristig erschlossen werden. Bezüglich der Voraussetzungen für eine erfolgreiche Erschließung der Potenziale, der Minimierung von Zielkonflikten¹⁸, der am besten geeigneten Politikinstrumente und der letztlich realisierbaren Emissionsminderungen besteht zudem noch erheblicher Forschungsbedarf.

Zwei „verwandte“ Strategien, die ebenfalls den (energie- und CO₂-intensiven) Ressourcenbedarf reduzieren und damit zum Klimaschutz beitragen könnten, sind Steigerungen der Materialeffizienz und Materialsubstitution. Eine Steigerung der Materialeffizienz kann unter anderem durch eine weitgehende Vermeidung von Verlusten in der Produktion erreicht werden. Wichtig ist zudem ein angepasstes, den Materialbedarf reduzierendes Design von Gebäuden, Fahrzeugen und Produkten. Ein Beispiel für Materialsubstitution ist hingegen die Priorisierung des (langlebigen) Materialeinsatzes von Holz – idealerweise ergänzt durch eine zunehmende Kaskadennutzung des Rohstoffs (z. B. durch das Recycling von unbehandeltem Altholz zur Verwendung in Spanplatten vor einer abschließenden energetischen Nutzung). Bei einer solchen Priorisierung kann es zu positive Substitutionseffekten kommen (Wüstemann et al. 2017), d. h. Holzbauten könnten beispielsweise den Bedarf an energie- und CO₂-intensiven Materialien wie Zement und Stahl reduzieren (Tollefson 2017). Diese beiden Strategien sollten komplementär und abgestimmt mit einer Kreislaufwirtschaftsstrategie verfolgt werden. Ebenso sind Bauweisen mit einem zwar erhöhten Stahl-, jedoch stark verringerten Betonbedarf ggf. sowohl hinsichtlich ihrer (durch bessere Wartbarkeit, z. B. bei Brücken) Langlebigkeit als auch besseren Recyclingfähigkeit einer betonintensiven Bauweise vorzuziehen – hier bieten sich also Holz und Stahl tendenziell als sich gegenseitig ergänzende Baustoffe an.

Im Folgenden wird anhand der Abfallwirtschaft konkretisiert, welche Rolle die Kreislaufwirtschaft zukünftig einnehmen könnte und warum eine Flankierung durch eine Strategie der Wiederverwendung und Vermeidung (d. h. Suffizienz) auch in diesem Bereich für erfolgreichen Klima- und Ressourcenschutz von hoher Bedeutung ist.

Recyclingtechnologien für Basismetalle wie Stahl oder Kupfer sind in Deutschland seit Jahrzehnten etabliert und sind vielfach in der Lage, Rohstoffe auf Basis von Abfällen zu produzieren, die der Qualität von Primärressourcen entsprechen. Die zentralen Herausforderungen stellen sich hier eher in den Bereichen Sammlung und Sortierung. Bei den Kunststoffen ist die Öko-Bilanz der stofflichen Verwertung häufig

¹⁸ So sind Materialverbunde zwar schwer recycelbar, sie führen jedoch häufiger auch zu geringerem Gesamtmaterialbedarf gegenüber alternativen Lösungen ohne Materialverbunde.

nicht ganz so eindeutig wie bei Metallen.¹⁹ Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft wird es dabei langfristig darauf ankommen, ökonomische Anreize und rechtliche Vorgaben zu entwickeln, die verhindern, dass Produkte auf den Markt kommen, die auch aus ökologischer Sicht nicht sinnvoll zu recyceln sind und daher thermisch verwertet werden müssen. Hierzu gehören beispielsweise viele Verpackungen, die aus mehreren Einzelschichten unterschiedlicher Kunststoffe hergestellt werden.

Diesbezüglich verlangt die Europäische Plastikstrategie, dass bis zum Jahr 2030 nur noch recyclingfähige Verpackungen am Markt erlaubt sein sollen. Damit steigt gleichzeitig jedoch die Notwendigkeit, frühzeitig darüber nachzudenken, was das beispielsweise für die Energieversorgung von Industrieparks bedeutet, die heute noch auf Ersatzbrennstoffe u. a. aus aufbereiteten Verpackungsabfällen setzen. Hierzu wird es einer mittel- und langfristig angelegten Kreislaufwirtschaftsstrategie für Deutschland (2030, 2050) bedürfen, in der diese verschiedenen Anforderungen sowohl im Sinne des Klima- und Ressourcenschutzes als auch der Wettbewerbsfähigkeit sinnvoll adressiert werden können.

Die aus Ressourcen- und Klimaschutzperspektive prioritäre Stufe der Abfallhierarchie bleibt jedoch die Vermeidung von Abfällen und damit eng gekoppelt die Wiederverwendung von Abfällen. Seit Jahrzehnten hat die Abfallvermeidung dennoch in der Praxis kaum eine Rolle gespielt, was sich erst kürzlich zu ändern scheint. U. a. aufgrund des chinesischen Importstopps für verschiedene Plastikabfälle ist hierzulande eine Diskussion entfacht worden, was die beeindruckend hohen Verwertungsquoten z. B. für Verpackungsabfälle tatsächlich aussagen oder ob wir auch angesichts der wachsenden Problematik der Plastikansammlung in Meeren nicht viel stärker auf Kunststoffe verzichten sollten.

Die kürzlich beschlossenen Produktverbote der EU-Kommission zeigen dabei eine gewisse Hilfslosigkeit, da sie bislang relativ unbedeutende Produkte betreffen. Das eigentliche Problem, die Verdopplung des Verpackungsabfalls in nur 20 Jahren, ist mit diesem Schritt bei Weitem noch nicht adäquat angegangen worden. Ein Blick in jeden Supermarkt verdeutlicht, dass es nach wie vor keine ausreichenden Anreize gibt, Vermeidung beim Design von Verpackungen zu berücksichtigen. Nur die Recyclingfähigkeit von Verpackungen in der Lizenzgebühr einzupreisen, wird daher nicht ausreichen – es wird klare, glaubhafte und langfristige Rahmenbedingungen und Vorgaben brauchen, um die notwendigen Investitionen in innovativere Verpackungen auszulösen. Möglicherweise lässt sich dabei z. B. von Frankreich lernen, wo verpackungsarme Lösungen im Rahmen der Gebührenstrukturen für die Inverkehrbringung von Produkten mit Rabatten belohnt werden. Im Gegensatz zu Deutschland hat es dort in den letzten zehn Jahren keinen Anstieg der Verpackungsabfälle gegeben.

¹⁹ Eine Studie des Öko-Instituts (2014) weist diesbezüglich aber darauf hin, dass sich die Klimabilanz der klassischen Müllverbrennung zukünftig deutlich verschlechtern wird, wenn überwiegend Energie aus erneuerbaren Quellen substituiert wird.

4 Fazit und Schlussfolgerungen

In Kapitel 2 der vorliegenden Studie hat eine Metaanalyse existierender Energieszenarien aufgezeigt, welche unterschiedlichen Vorstellungen es bezüglich der fortgesetzten Transformation hin zu einem THG-armen bzw. THG-freien deutschen Energiesystems gibt. Dabei wurde zum einen deutlich, dass die vorliegenden Studien davon ausgehen, dass es **grundsätzlich möglich ist, die energiebedingten THG-Emissionen Deutschlands bis Mitte des Jahrhunderts gegenüber 1990 um mindestens rund 85 % und um bis zu 100 % zu reduzieren**. Zum anderen hat die Metaanalyse gezeigt, dass es bestimmte Klimaschutzstrategien gibt, die in allen betrachteten Klimaschutzszenarien eine bedeutende Rolle spielen (z. B. deutliche Erhöhung der Energieeffizienz, verstärkte Elektrifizierung in den Endenergiesektoren, starker Ausbau der erneuerbaren Energien), während es andere Strategien gibt, die nur in einigen der betrachteten Klimaschutzszenarien verfolgt werden (z. B. Verhaltensänderungen, Importe synthetischer Energieträger, Einsatz von CCS im Industriebereich).

Die abweichende Bedeutung einzelner Strategien erklärt sich zum einen durch unterschiedliche Klimaschutz-Ambitionsniveaus der Szenarien. So greifen ambitioniertere Klimaschutzszenarien auf eine größere Anzahl an Strategien zurück und/oder verfolgen einzelne Strategien in höherer Intensität. Zum anderen erklärt sich die Auswahl und Intensität der Klimaschutzstrategien aber auch durch abweichende Einschätzungen und Präferenzen der Entwickler der Szenarien bzw. der Auftraggeber der jeweiligen Studien. Explizit werden als Begründungen für die Wahl einzelner Strategien bzw. deren Verzicht häufig Kostendifferenzen oder aber Unterschiede in der gesellschaftlichen Akzeptanz genannt. Erwartete Auswirkungen auf die Natur spielen bei der Begründung der Auswahl und Intensität einzelner Klimaschutzstrategien in den untersuchten Studien hingegen i. d. R. keine explizite Rolle. Und dies, obwohl insbesondere die in allen Szenarien zentrale Strategie einer deutlich stärkeren Nutzung erneuerbarer Energien sehr relevante Auswirkungen auf die natürlich Umwelt, d. h. vor allem die heimische Tier- und Pflanzenwelt haben kann.

Um vor diesem Hintergrund ein besseres Verständnis für die Voraussetzungen, Realisierungsmöglichkeiten und THG-Minderungswirkung von (potenziell) naturverträglich(er)en Klimaschutzstrategien zu erlangen, wurden in Kapitel 3 dieser Studie solche Klimaschutzstrategien vertieft diskutiert, die voraussichtlich keine oder zumindest relativ niedrige Auswirkungen auf die heimische Natur haben. Unter diesen Strategien wird nur eine Strategie (eine deutliche Erhöhung der Energieeffizienz) in allen betrachteten Energieszenarien in starkem Maße unterstellt. Die übrigen naturverträglicheren Strategien werden nur in einigen bzw. wenigen der betrachteten Szenarien angenommen, und häufig auch nur in begrenzter Intensität.

Die Diskussion der verschiedenen (potenziell) naturverträglichen Klimaschutzoptionen legt nahe, dass es noch bedeutende Potenziale zur THG-Emissionsreduktion in Deutschland gibt, die ohne oder mit nur relativ geringen negativen Einflüssen auf die Natur umsetzbar wären. Diese Potenziale werden in den bekannten vorliegenden Energie- bzw. Klimaschutzszenarien teilweise nicht oder nur marginal berücksichtigt. Und auch in der breiten öffentlichen Diskussion spielen einige dieser Strategien – wenn überhaupt – nur eine untergeordnete Rolle. Die vorliegende Studie möchte

daher einen Anstoß dafür geben, diese vielversprechenden Strategien besser zu verstehen und stärker ins öffentliche Bewusstsein zu bringen.

Ein Vergleich der THG-Einsparpotenziale der verschiedenen vergleichsweise naturverträglichen Strategien ist schwierig und kann an dieser Stelle nicht geleistet werden, nicht zuletzt weil das realisierbare Potenzial in starkem Maße davon abhängt, wie intensiv eine bestimmte Strategie zukünftig verfolgt wird. Die realisierbare Umsetzungsintensität kann jedoch – auch aufgrund vorhandener Forschungslücken (s. unten) – zum jetzigen Zeitpunkt kaum seriös abgeschätzt werden. Eine Bewertung der verschiedenen Strategien, die z. B. aus Sicht eines Naturschutzverbandes notwendig sein könnte, um zu entscheiden, auf welche Strategien in der Kommunikation gegenüber Öffentlichkeit und Politik fokussiert werden sollte, könnte sich jedoch alternativ bzw. zusätzlich auch an anderen Kriterien orientieren. So bewertet ein multikriterieller Vergleich verschiedene Strategien anhand ausgewählter, aus gesellschaftlicher Sicht relevanter Kriterien. Durch eine solche „Multikriterienanalyse“ („multi criteria analysis“, MCA) können Vor- und Nachteile der einzelnen Strategien aufgezeigt und eine Auswahl bevorzugter bzw. prioritär zu verfolgender Strategien erleichtert werden.

Während eine umfassende Multikriterienanalyse der identifizierten vergleichsweise naturverträglichen Klimaschutzstrategien im Rahmen dieser Studie nicht geleistet werden konnte, wird im Folgenden (s. Tabelle 13) eine erste, vereinfachte Kriterienbasierte Analyse dargestellt, die im Wesentlichen auf (teilweise vorläufigen) qualitativen Einschätzungen der Autoren dieser Studie basiert. Dabei werden die Strategien in Hinblick auf die folgenden sechs Kriterien bewertet:

- **Naturverträglichkeit**
Möglichst geringe negative Einflüsse auf Ökosystem (inkl. Berücksichtigung der Einflüsse außerhalb Deutschlands)
- **Ressourcenschutz**
Möglichst geringer Ressourcenbedarf (kritische/seltene Ressourcen sind besonders stark zu gewichten)
- **Hohe Umsetzungsgeschwindigkeit**
Bedeutende THG-Emissionsreduktionen lassen sich bereits kurz- bis mittelfristig realisieren
- **Gesellschaftliche Akzeptanz**
Keine wesentlichen gesellschaftlichen Einwände sind zu erwarten
- **Geringe Kosten**
Mit der Umsetzung der Strategie sind relativ geringe Kosten (Investitions- und Betriebskosten) verbunden
- **Unabhängigkeit vom Ausland**
Der Erfolg der Strategie ist (weitgehend) unabhängig von Entscheidungen, die im Ausland getroffen werden

Tabelle 13: Kriterien-basierter Vergleich (als vorläufig zu betrachten) der in dieser Studie identifizierten potenziell naturverträglichen Klimaschutzstrategien

	Natur- verträglichkeit	Ressourcen- schutz	Hohe Umset- zungs- geschwindigkeit	Gesellschaft- liche Akzeptanz	Geringe Kosten	Unabhängigkeit vom Ausland
Stärkere Nutzung von Foto- voltaik anstatt von Wind- energie	+	°	+	+	°	°
Stärkere Nutzung anderer Erneuerbarer anstatt von Biomasse	+	° (?)	°	+	-	°
Deutliche Erhöhung der Energieeffizienz	++	+	°	+	+	+
Verbreitung von suffiziente- ren Lebensstilen	++	++	+	+	++	+
Import von erneuerbar er- zeugtem Strom	+	° (?)	-	° (?)	+	--
Import von auf Basis erneu- erbarer Energien erzeugter synthetischer Energieträger	+	° (?)	-	+	+	-
Einsatz von CCS im Indust- riesektor zur Reduktion des Bedarfs an erneuerbar er- zeugtem Strom	+	° (?)	--	-	° (?)	°
Förderung natürlicher Sen- ken	++	++	+	+	° (?)	+
Materialsstitution/- effizienz und Kreislaufwirt- schaft	++	++	-	+	° (?)	° (?)

Bei der Bewertung anhand der sechs unterschiedenen Kriterien wird für jede Strategie angenommen, dass ohne die Nutzung dieser Strategie als alternative Maßnahme zur Erreichung eines bestimmten THG-Minderungsziels auf eine stärkere Nutzung inländischer erneuerbarer Energien (v. a. Wind oder Fotovoltaik als potenziell stark ausbaubare erneuerbare Energieträger) gesetzt werden müsste bzw. ggf. auch auf synthetische Energieträger, die auf Grundlage von erneuerbar erzeugtem Strom produziert werden. Die Bewertung der einzelnen Strategien für jedes Kriterium ist also immer relativ zu der Referenzstrategie „Stärkere Nutzung der heimischen erneuerbaren Energien“ zu sehen (bzw. im Falle der ersten beiden diskutierten Strategien speziell relativ zu einem stärkeren Ausbau der Windenergie bzw. der Biomasse). Die Bewertungen reichen dabei von „++“ und „+“ (Kriterium wird deutlich bzw. etwas besser als die Referenzstrategie erfüllt) über „o“ (kein wesentlicher Unterschied zur Referenzstrategie) bis hin zu „-“ und „--“ (etwas schlechter bzw. deutlich schlechter als die Referenzstrategie). Ein „?“ ist dort zusätzlich abgebildet, wo eine Einschätzung mit besonderer Unsicherheit verbunden ist bzw. die genaue Art der Umsetzung einer Strategie die Bewertung eines Kriteriums wesentlich beeinflussen würde. Kurze Erläuterungen zu vielen der Bewertungen finden sich in Anhang E.

Aus dieser vorläufigen multikriteriellen Analyse der als potenziell naturverträglich eingeschätzten Klimaschutzstrategien sowie der Diskussion dieser Strategien in Kapitel 3 lassen sich zentrale Schlussfolgerungen ableiten. **Zunächst ist grundsätzlich festzustellen, dass es eine Reihe von Klimaschutzstrategien gibt, die nach derzeitigem Wissensstand keine oder vergleichsweise geringe negative Auswirkungen auf die Natur hätten und gleichzeitig bei konsequenter Umsetzung durch Gesellschaft und Politik relevante Beiträge zum Erreichen ambitionierter THG-Minderungen beisteuern können.** Eine konsequente Umsetzung dieser Strategien könnte eine deutlich verminderte Nutzung naturschutzfachlich weniger günstiger Klimaschutzmaßnahmen erlauben, ohne Kompromisse bei der Minderung von THG-Emissionen eingehen zu müssen.

Vorteilhaft erscheint vor allem eine (stärkere) Verfolgung der folgenden Strategien:

- **Energieeffizienz:** Zu den vergleichsweise naturverträglichen Klimaschutzstrategien zählt mit der Energieeffizienz eine Strategie, auf die sowohl in vorliegenden Energieszenarien als auch seitens der Energiepolitik in starkem Maße gesetzt wird. Der Umsetzungserfolg dieser Strategie ist bisher allerdings als unzureichend zu bezeichnen. Zusätzliche bzw. konsistentere Politikmaßnahmen sind im Bereich der Energieeffizienz dringend auf den Weg zu bringen, zumal die Strategie der Energieeffizienz in Hinblick auf verschiedene Kriterien vorteilhaft erscheint. Gleichzeitig sollten mögliche Rebound-Effekte bedacht und über angemessene Maßnahmen möglichst vermieden werden.
- **Verbreitung von suffizienteren Lebensstilen:** Völlig unproblematisch für den Naturschutz und auch in Bezug auf die anderen hier unterschiedenen Kriterien besonders vorteilhaft ist die Strategie der Verbreitung von suffizienteren Lebensstilen. Ein deutlicher Klimaschutzbeitrag durch diese Strategie wird in den meisten vorliegenden Szenarien nicht angenommen. Auch energiepolitisch wird diese Strategie derzeit nicht erkennbar verfolgt.

Diese Vernachlässigung einer potenziell vielversprechenden Klimaschutzoption sollte dringend behoben werden. Hinweise für die Umsetzung einer Suffizienzpolitik liefern u. a. Schneidewind und Zahrnt (2013) und Thomas et al. (2017).

- **Verstärkte Nutzung von Fotovoltaik:** Eine vielversprechende Option zur Verbesserung der Naturverträglichkeit des Ausbaus der erneuerbaren Energien scheint eine – gegenüber derzeitigen Planungen für die Zukunft – verstärkte Nutzung von Fotovoltaik bei gleichzeitig geringerer Nutzung von Onshore- und/oder Offshore-Windenergie zu sein. Zumindest kleinere bis mittlere Anlagen auf Dächern bzw. bestehenden baulichen Strukturen haben aus Naturschutz-Sicht Vorteile und auch in Hinblick auf weitere Kriterien schneidet die Fotovoltaik teilweise (etwas) besser ab (gesellschaftliche Akzeptanz und Umsetzungsgeschwindigkeit). Bezüglich des Kriteriums der „Kosten“ deuten aktuelle Studien darauf hin, dass eine solche Strategie ohne oder mit nur vernachlässigbaren Zusatzkosten realisierbar wäre. Eine – ggf. durch zusätzliche Untersuchungen zu fundierende – Überarbeitung der durch die Bundesregierung formulierten Ausbauziele scheint in Bezug auf das Verhältnisses zwischen Sonnen- und Windenergie angebracht zu sein.
- **Förderung natürlicher Senken:** Außerhalb des Energiesektors scheint die Förderung natürlicher Senken – bei vielfach hohen Synergien mit Belangen des Naturschutzes – relevantes THG-Minderungspotenzial zu haben. Auch über das Kriterium des Naturschutzes hinaus schneidet diese Strategie in Bezug auf viele der betrachteten Kriterien positiv ab. Folglich erscheint ein stärkerer klimapolitischer Fokus auf die Förderung natürlicher Senken angebracht zu sein, auch wenn das genaue Minderungspotenzial dieser Strategie derzeit noch schwierig abzuschätzen ist und möglicherweise begrenzter ist als das Potenzial anderer Strategien.

Weitere potenziell naturverträgliche Strategien sind weniger eindeutig positiv zu bewerten, sollten aber dennoch nicht verworfen werden, da sie bei umsichtiger Umsetzung in Zukunft möglicherweise relevante Beiträge für die Realisierung einer naturverträglichen Energiewende leisten können:

- **Import von erneuerbar erzeugtem Strom bzw. auf Basis erneuerbarer Energien erzeugter synthetischer Energieträger:** Diese Strategie ist bezüglich ihrer Naturverträglichkeit nicht eindeutig als positiv zu bewerten, da relevante negative Effekte auf den Naturschutz durch die Anlagen in den exportierenden Ländern sowie die benötigte Infrastruktur möglich sind. Zudem können die mit einer solchen Strategie verbundene Abhängigkeit vom Ausland sowie die Tatsache, dass diese Strategie u. a. aufgrund des benötigten Infrastrukturausbaus nur mittel- bis langfristig bedeutende Beiträge zur THG-Minderung leisten kann, als negativ angesehen werden. Dennoch erscheint es aus heutiger Sicht möglich oder gar wahrscheinlich, dass aufgrund der Erneuerbaren-Potenzialgrenzen in Deutschland bei ambitioniertem Klimaschutz langfristig auch auf eine Importstrategie gesetzt werden muss. Dies scheint auch im Vergleich zum Status-quo der derzeitigen Energieversorgung, die sich zu über 70 % auf importierte Ener-

gieträger stützt, angemessen. Diese Strategie sollte allerdings bezüglich ihrer Kosten, Umsetzungsmöglichkeiten und Auswirkungen auf die Natur näher untersucht werden.

- **Einsatz von CCS im Industriesektor:** Nicht zuletzt aufgrund des mit der Nutzung von CCS einhergehenden Bedarfs an fossilen Energieträgern und den damit verbundenen Problemen bei der Förderung, dem Transport und der Nutzung dieser Energieträger, kann diese Strategie bezüglich des Naturschutzes weniger eindeutig als positiv eingeschätzt werden. Zudem weist sie insbesondere in Hinblick auf die Umsetzungsgeschwindigkeit und (vermutlich) auch bezüglich der gesellschaftlichen Akzeptanz Nachteile auf. Dennoch gilt auch für diese Option, dass sie nicht grundsätzlich verworfen werden sollte, da sie langfristig – zumindest in begrenztem Maße (v. a. für bestimmte ansonsten kaum vermeidbare Prozessemissionen) und über einen begrenzten zeitlichen Raum – eine relevante Rolle spielen könnte, um bei ambitioniertem Klimaschutz den Bedarf an erneuerbarer Stromerzeugung bzw. Biomasse in vertretbarem Rahmen zu halten.

Insgesamt zeigt die vorliegende Metastudie:

- Die vorliegenden Klimaschutzszenarien für Deutschland stimmen klar darin überein, dass es grundsätzlich möglich ist, die energiebedingten THG-Emissionen Deutschlands bis Mitte des Jahrhunderts gegenüber 1990 um rund 85 % bis 100 % zu reduzieren.
- Einige aktuelle Studien (Matthes et al. 2018, UBA 2017) deuten zudem darauf hin, dass für eine solche Strategie (die zu einer für die Natur in Deutschland und weltweit sehr wichtigen Verlangsamung des Klimawandels beiträgt) in Deutschland grundsätzlich ausreichend Flächen für eine insgesamt naturverträgliche Realisierung des erforderlichen Ausbaus der erneuerbaren Energien vorhanden sind.
- Die vorliegende Studie zeigt zudem, dass es eine Reihe von Klimaschutzstrategien gibt, die die dennoch vorhandenen möglichen negativen Auswirkungen auf die Natur zumindest deutlich verringern könnten und die in den bisher hauptsächlich in der Wissenschaft und Politik diskutierten Klimaschutzpfaden zumeist – wenn überhaupt – nur am Rande berücksichtigt werden.

Es kann also festgehalten werden, dass eine Energiewende, die (in Deutschland und weltweit) die THG-Emissionen des Energiesystems durch den Umstieg auf erneuerbare Energien bis zur Mitte des Jahrhunderts um (nahezu) 100 % verringert, die zentrale Strategie zum Schutz der natürlichen Umwelt ist. Es lohnt sich allerdings sehr, die Ausgestaltung der Energiewende gegenüber bisherigen Vorstellungen weiter zu optimieren, da somit die Naturverträglichkeit des Energiesystems (und somit auch die Akzeptanz für die Umsetzung der Energiewende) deutlich verbessert werden kann, ohne in Bezug auf das Hauptziel des Klimaschutzes Kompromisse eingehen zu müssen.

5 Literaturverzeichnis

AG ENERGIEBILANZEN (2018a): Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern. https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20171221_brd_stromerzeugung1990-2017.pdf.

AG ENERGIEBILANZEN (2018b): Auswertungstabellen. <https://ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>.

AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN (2017): Erneuerbare Wärme sorgt für verlässliche und niedrige Heizkosten. <https://www.unendlich-viel-energie.de/themen/waerme/erneuerbare-waerme-sorgt-fuer-verlaessliche-und-niedrige-heizkosten>.

AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN (2018): Klares Bekenntnis der deutschen Bevölkerung zu Erneuerbaren Energien. <https://www.unendlich-viel-energie.de/themen/akzeptanz-erneuerbarer/akzeptanz-umfrage/klares-bekenntnis-der-deutschen-bevoelkerung-zu-erneuerbaren-energien>.

ARNETT, E. B. ET AL. (2016): Chapter 11 – Impacts of Wind Energy Development on Bats: A Global Perspective, in: Voigt, C.; Kingston, T. (Hrsg.): Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World. Springer.

ARNETT, E. B.; MAY, R. F. (2016): Mitigating Wind Energy Impacts on Wildlife: Approaches for Multiple Taxa. Human–Wildlife Interactions. Bd. 10, H. 1, Artikel 5.

BACCINI, A.; WALKER, W.; CARVALHO, L.; FARINA, M.; SULLA-MENASHE, D.; HOUGHTON, R. A. (2017): Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. Science, Bd. 358, S. 230–234.

BÄHR, C. C. (2015): Greenhouse Gas Taxes on Meat Products: A Legal Perspective. Transnational Environmental Law, Bd. 4, H. 1, S. 153–179.

BAILEY, R.; FROGGATT, A.; WELLESLEY, L. (2014): Livestock–Climate Change’s Forgotten Sector. Chatham House.

BELLEBAUM, J.; KORNER-NIEVERGELT, F.; DÜRR, T.; MAMMEN, U. (2013): Wind turbine fatalities approach a level of concern in a raptor population. Journal for Nature Conservation, Bd. 21, H. 6, S. 394–400.

BENNDORF, R. ET AL. (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Umweltbundesamt. http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_dt.pdf.

BET; Hamburg Institut (2015): Klimaschutz: Der Plan – Energiekonzept für Deutschland, Greenpeace e.V.
<https://www.greenpeace.de/files/publications/klimaschutz-der-plan-greenpeace-20151117.pdf>.

BFN (2016): Schutz gebäudebewohnender Tierarten vor dem Hintergrund energetischer Gebäudesanierung in Städten und Gemeinden – Hintergründe, Argumente, Positionen.
https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/planung/siedlung/Dokumente/Gebaeudebruete_nde_Tierarten_2016_-_Positionspapier.pdf.

BINSWANGER, M. (2006): Why does income growth fail to make us happier? The Journal of Socio-Economics, Bd. 35, H. 2, S. 366–381.

BMUB (2016): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung.
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf.

BMVI (2015): Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland.
https://www.bbr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/ministerien/BMVI/BMVIOnline/2015/DL_BMVI_Online_o8_15.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

BMW i (2018): Sechster Monitoring-Bericht „Energie der Zukunft“.
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sechster-monitoring-bericht-zur-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=27.

BUHL, J. (2016): Rebound-Effekte im Steigerungsspiel: Zeit- und Einkommenseffekte in Deutschland. Baden-Baden. Nomos.

BUND (2015): Grundlagen und Konzepte einer Energiewende 2050.
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/klimawandel/klima_energie_energiewendekonzept.pdf.

BUNDESVERBAND WINDENERGIE (2018): Windenergie in Deutschland – Zahlen und Fakten. <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland/>.

BURCHARDT, H.-J.; DIETZ, K. (2014): (Neo-)extractivism – a new challenge for development theory from Latin America. Third World Quarterly. Bd. 35, H. 3, S. 468–486.

BVDF (2018): Fleischverbrauch und Fleischverzehr je Kopf der Bevölkerung.
https://www.bvdf.de/in_zahlen/tab_o5.

CAPPER, J. L. (2011): Replacing rose-tinted spectacles with a high-powered microscope: The historical versus modern carbon footprint of animal agriculture. Animal Frontiers. Bd. 1, H. 1, S. 26–32.

CARSTENSEN, J.; ANDERSEN, J. H.; GUSTAFSSON, B. G.; CONLEY, D. J. (2014): Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Bd. 111, H. 15, S. 5628–5633.

CEBULLA, F.; HAAS, J.; EICHMAN, J.; NOWAK, W.; MANCARELLA, P. (2018): How much electrical energy storage do we need? A synthesis for the U.S., Europe, and Germany. *Journal of Cleaner Production*. Bd. 181, S. 449-459.

DE BOER, J.; DE WITT, A.; AIKING, H. (2016): Help the climate, change your diet: A cross-sectional study on how to involve consumers in a transition to a low-carbon society. *Appetite*. 9819–27.

DEMUTH, B.; HEILAND, S.; LUICK, R.; VEDEL, D.; AMMERMANN, K.; WIERSBINSKI, N. (Hrsg.) (2016): Die Energiewende im Spannungsfeld energiepolitischer Ziele, gesellschaftlicher Akzeptanz und naturschutzfachlicher Anforderungen. BfN-Skripten 433.

<https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript433.pdf>.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ERNÄHRUNG E. V. (Hrsg.) (2017): 13. DGE-Ernährungsbericht. Bonn.

DEUTSCHE WINDGUARD (2018): Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland.

https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2018/Status%20des%20Onshore-Windenergieausbaus%20in%20Deutschland%2C%20Gesamtjahr%202017.pdf.

DEUTSCHER BUNDESTAG (2007): Landwirtschaft und Klimaschutz. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Bärbel Höhn, Hans-Josef Fell, Cornelia Behm, Ulrike Höfken und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN No. 16/ 5346. Kleine Anfrage. Berlin.

DIECKHOFF, C. (2015): Modellierter Zukunft – Energieszenarien in der wissenschaftlichen Politikberatung. Transcript Verlag.

DII (2012): 2050 Desert Power – Perspectives on a Sustainable Power System for EUMENA.

http://mait.camins.cat/ET2050_library/docs/tech/energy/2012_2050_Desert_Power.pdf.

DIJKS, S.; THYLMANN, M.; PETERS, W. (2018): Regionale Auswirkungen des Windenergieausbaus auf die Vogelwelt – Eine exemplarische Untersuchung von sechs bundesdeutschen Landkreisen. Umweltstiftung WWF Deutschland.

https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_WEA_Vogelwelt.pdf.

DINGES, K. et al. (2017): Weiterentwicklung der Energieeffizienzpolitiken zur Erreichung der Klimaschutzziele der Europäischen Union bis 2050, im Auftrag des Umweltbundesamtes.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-09-04_climate-change_21-2017_energieeffizienzpolitik.pdf.

DONALDSON, S.; KYMLICKA, W. (2013): Zoopolis. Eine politische Theorie der Tierrechte. (J. Schulte, Übers.). Berlin. Suhrkamp Verlag.

DU PONT, R. Y.; JEFFERY M. L.; GÜTSCHOW, J.; ROGELJ, J.; CHRISTOFF, P., MEINSHAUSEN, M. (2017): Equitable mitigation to achieve the Paris Agreement goals. Nature Climate Change, Bd. 7, S. 38-45.

ECKE, J.; KLEIN, S.; KLEIN, S. W.; STEINERT, T. (2017): Klimaschutz durch Sektorenkopplung: Optionen, Szenarien, Kosten. enervis.

https://vng.de/sites/default/files/enervis_klimaschutz_durch_sektorenkopplung.pdf.

ENKVIST, P.-A.; KLEVNÄS, P. (2018): The Circular Economy - A Powerful Force for Climate Mitigation. Transformative innovation for prosperous and low-carbon industry. Material Economics. <http://materialeconomics.com/publications/the-circular-economy>

ERB, K.-H. ET AL. (2017): Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. Nature.

ERICKSON, W. P.; WOLFE, M. M.; BAY, K. J.; JOHNSON, D. H.; GEHRING, J. L. (2014): A Comprehensive Analysis of Small-Passerine Fatalities from Collision with Turbines at Wind Energy Facilities. PLoS ONE 9 (9).

EUROPÄISCHE KOMMISSION (2015): Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52015DC0614&from=EN>.

EWI ER&S (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende – Teil B: Gutachterbericht.

https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf.

FABER, J. ET AL. (2012): Behavioural Climate Change Mitigation Options and Their Appropriate Inclusion in Quantitative Longer Term Policy Scenarios.

https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/main_report_en.pdf.

FASIHI, M.; BOGDANOV, D.; BREYER, C. (2016): Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. 10th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2016, 15.-17. März 2016, Düsseldorf.

FATH, K. (2018): Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000081498/14534279>.

FISCHER, C.; GRIESSHAMMER, R.; BARTH, R.; BROHMANN, B.; BRUNN, C.; HEYEN, D. A.; KEIMEYER, F.; WOLFF, F. (2013): Mehr als nur weniger. Suffizienz: Begriff, Begründung und Potenziale. Freiburg. Öko-Institut Working Paper 22013.

FNR (2014): Marktübersicht - Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/r/broschuere_daemstoffe-web_v02.pdf.

FONT VIVANCO, D.; KEMP, R.; VAN DER VOET, E. (2015): The relativity of eco-innovation: environmental rebound effects from past transport innovations in Europe. Journal of Cleaner Production. Bd. 10, S. 171–185.

FRAUNHOFER ISE (2015): Was kostet die Energiewende? – Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2015/Fraunhofer-ISE_Transformation-Energiesystem-Deutschland_final_19_11.pdf.

FRAUNHOFER ISI; CONSENTEC, IFEU (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

FRAUNHOFER IWES (2017): Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergie für die Energiewende. <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschungsthemen/energie/Energiewirtschaftliche-Bedeutung-von-Offshore-Windenergie.pdf>.

FREIRE-GONZÁLEZ, J.; FONT VIVANCO, D. (2017): The influence of energy efficiency on other natural resources use: An input-output perspective. Journal of Cleaner Production. Bd. 162, S. 336–345.

FRICK, W. F. ET AL. (2017): Fatalities at wind turbines may threaten population viability of a migratory bat. Biological Conservation, Bd. 209, S. 172–177.

FUHRHOP, D. (2015): Verbiestet das Bauen! eine Streitschrift. München. Oekom Verlag.

GALLOWAY, J. N. ET AL. (2008): Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. Science. Bd. 320. S. 889–892.

GARNETT, T. ET AL. (2017): Grazed and confused? Ruminating on cattle, grazing systems, methane, nitrous oxide, the soil carbon sequestration question – and what it all means for greenhouse gas emissions. http://www.fcrrn.org.uk/sites/default/files/project-files/fcrrn_gnc_report.pdf.

GASPARATOS, A.; DOLL, C. N. H.; ESTEBAN, M.; AHMED, A.; OLANG, T. A. (2017): Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Bd. 70, S. 161-184.

GERBERT, P. ET AL. (2018): Klimapfade für Deutschland.

<https://e.issuu.com/embed.html#2902526/57478058>.

GILBERT, N. (2012): One-third of our greenhouse gas emissions come from agriculture. Nature News. doi: 10.1038/nature.2012.11708.

GILS, H. C.; SCHOLZ, Y.; PREGGER, T.; DE TENA, D. L.; HEIDE, D. (2017): Integrated modelling of variable renewable energy-based power supply in Europe. Energy, Bd. 123, S. 173-188.

GOEDKOOP, M. J.; VAN HALEN, C. J. G.; RIELE, H. R. M.; ROMMENS, P. J. M. (1999): Product Service systems, Ecological and Economic Basics. No. 990570. The Hague, Netherlands. Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, VROM.

GOULD, K. A.; PELLOW, D. N.; SCHNAIBERG, A. (2004): Interrogating the treadmill of production: Everything you wanted to know about the treadmill but were afraid to ask. Organization & Environment. Bd. 17, H. 3, S. 296–316.

GRIESSHAMMER, R.; BROMMER, E.; GATTERMANN, M.; GREETHER, S.; KRÜGER, M.; TEUFEL, J.; ZIMMER, W.; GEFÖRDERTEN PROJEKTS, R. (2010): CO₂-Einsparpotenziale für Verbraucher. <http://www.oeko.de/oekodoc/1029/2010-081-de.pdf>.

HALLSTRÖM, E.; CARLSSON-KANYAMA, A.; BÖRJESSON, P. (2015): Environmental impact of dietary change: a systematic review. Journal of Cleaner Production, Bd. 91, S. 1–11.

HARTHAN, R. O. ET AL. (2018): Umsetzung Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 – Begleitung der Umsetzung der Maßnahmen des Aktionsprogramms. 2. Quantifizierungsbericht (2017). <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/APK-2020-Quantifizierungsbericht-2017-final.pdf>.

HARTJE, V. J.; WÜSTEMANN, H.; BONN, A.; NATURKAPITAL DEUTSCHLAND - TEEB DE (Hrsg.) (2015): Naturkapital und Klimapolitik: Synergien und Konflikte. Berlin.

HEINRICH-BÖLL-STIFTUNG; BUND; LE MONDE DIPLOMATIQUE (2018): Fleischatlas 2018 – Rezepte für eine bessere Tierhaltung. Berlin. Heinrich-Böll-Stiftung, BUND, Le Monde Diplomatique. https://www.boell.de/sites/default/files/fleischatlas_2018_web.pdf?dimension1=ds_fleischatlas_2018.

HERDEN, C.; RASSMUS, J.; GHARADJEDAGHI, B. (2009): Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von Freilandphotovoltaikanlagen. Bundesamt für Naturschutz. <https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript247.pdf>.

HERNANDEZ, R. R. ET AL. (2014): Environmental impacts of utility-scale solar energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Bd. 29, S. 766–779.

HUMPHRIES, R. N.; BRAZIER, R. E. (2018): Exploring the case for a national-scale soil conservation and soil condition framework for evaluating and reporting on environmental and land use policies. Soil Use and Management, Bd. 34, H. 1, S. 134–146.

IDEL, A. (2016): Die Kuh ist kein Klimakiller! wie die Agrarindustrie die Erde verwüstet und was wir dagegen tun können. Agrarkultur im 21. Jahrhundert. Marburg. Metropolis-Verlag.

ILLICH, I. (1973): Tools of Conviviality. World Perspectives. [https://kok.memoryoftheworld.org/Ivan%20Illich/Tools%20of%20Conviviality%20\(476\)/Tools%20of%20Conviviality%20-%20Ivan%20Illich.pdf](https://kok.memoryoftheworld.org/Ivan%20Illich/Tools%20of%20Conviviality%20(476)/Tools%20of%20Conviviality%20-%20Ivan%20Illich.pdf).

IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. M. B. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, et al., Hrsg.) Assessment Report. New York. Cambridge University Press.

KIRCHNER, A. ET AL. (2009): Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Modell_Deutschland_Endbericht.pdf.

KÖLBEL, T., EGDELING, L. (2012): Strom aus Geothermie: Kosten und Kostensenkungspotenziale. bbr-Sonderheft Geothermie.

KOST, C.; SHAMMUGAM, S; JÜLCH, V.; NGUYEN, H.-Y.; SCHLEGL, T. (2018): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studien/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf.

LAGE, J. (2017): Suffizienz als Bestandteil des kommunalen Klima- und Umweltschutzes in Flensburg: Erfordernisse und Potentiale. Masterarbeit. Flensburg: Europa-Universität Flensburg, Energie- und Umweltmanagement.

LIEBEREI, J.; GHEEWALA, S. H. (2017): Resource depletion assessment of renewable electricity generation technologies – comparison of life cycle impact assessment methods with focus on mineral resources. International Journal of Life Cycle Assessment, Bd. 22, S. 185-198.

LÖSCHEL, A.; ERDMANN, G.; STAISS, F.; ZIESING, H.-J. (2018): Stellungnahme zum sechsten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2016. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stellungnahme-der-expertenkommission-zum-sechsten-monitoring-bericht.pdf?__blob=publicationFile.

LOSKE, R. (2014): Zum Spannungsverhältnis von Freiheit und Ökologie. Ökologisches Wirtschaften – Fachzeitschrift. Bd. 29, H. 4, S. 8–9.

LOSS, S. R.; WILL, T.; MARRA, P. P. (2015): Direct Mortality of Birds from Anthropogenic Causes. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. Bd. 46, S. 99–120.

LÖWENSTEIN, F. ZU (2011): Food crash: wir werden uns ökologisch ernähren oder gar nicht mehr. München. Pattloch.

MANTAU, U.; DÖRING, P.; WEIMAR, H.; GLASENAPP, S. (2018): Rohstoffmonitoring Holz. No. 38. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

MATTHES, F. C.; FLACHSBARTH, F.; LORECK, C.; HERMANN, H.; FALKENBERG, H.; COOK, V. (2018): Zukunft Stromsystem II – Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung. WWF Deutschland. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Studie-Stromsystem-Erneuerbare-Energien.PDF.

MAY, R.; REITAN, O.; BEVANGER, K.; LORENTSEN, S.-H.; NYGARD, T. (2015): Mitigating wind-turbine induced avian mortality: Sensory, aerodynamic and cognitive constraints and options. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Bd. 42, S. 170–181.

MAYER, A. (2017): Vogeltod: Nicht nur Windräder. <http://www.klimaretter.info/meinungen/standpunkte/23367-vogeltod-nicht-nur-windraeder>.

MCINTYRE, B. D. (Hrsg.) (2009): Global report. Agriculture at a crossroads. Washington, DC. Island Press.

METER, K. J. V.; CAPPELLEN, P. V.; BASU, N. B. (2018): Legacy nitrogen may prevent achievement of water quality goals in the Gulf of Mexico. Science. Bd. 360, S. 427–430.

MINISTRY OF AGRICULTURE, AGRIFOOD AND FORESTRY, FRANCE (2015): Join the 4%. Soils for food security and climate. The 4% Initiative. <http://newsroom.unfccc.int/media/408539/4-per-1000-initiative.pdf>.

NIJDAM, D.; ROOD, T.; WESTHOEK, H. (2012): The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. Food Policy, Bd. 37, H. 6, S. 760–770.

- NITSCH, J. (2008): „Leitstudie 2008“ – Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas.
https://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal_news/newsarchiv2008_5/Leitstudie2008_unters.pdf.
- NITSCH, J. (2017): Erfolgreiche Energiewende nur mit verbesserter Energieeffizienz und einem klimagerechten Energiemarkt – Aktuelle Szenarien 2017 der deutschen Energieversorgung. https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Erfolgreiche_Energiewende_Szenarien_2017_Nitsch.pdf.
- NORDBORG, M. (2016): Holistic management – a critical review of Allan Savory’s grazing method. Uppsala. SLU/EPOK – Centre for Organic Food & Farming & Chalmers.
- NOTARNICOLA, B.; TASSIELLI, G.; RENZULLI, P. A.; CASTELLANI, V.; SALA, S. (2017): Environmental impacts of food consumption in Europe. Journal of Cleaner Production. Bd. 140 (2), S. 753-765.
- ÖI; UMSICHT; IE; IFEU; IZES; TUBS; TUM (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse.
<https://www.oeko.de/oekodoc/236/2004-025-de.pdf>.
- ÖKO-INSTITUT (2014): Wesentliche Erkenntnisse aus der Studie des Öko-Instituts im Auftrag des BDE. <https://www.oeko.de/oekodoc/1858/2014-005-de.pdf>.
- PACHAURI, R. K.; MAYER, L. (Hrsg.) (2015): Climate Change 2014: Synthesis Report. Geneva, Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC.
- PAECH, N. (2016): Befreiung vom Überfluss: auf dem Weg in die Postwachstumsökonomie. München. oekom Verlag.
- PETTIT, P. (2003): Agency-freedom and option-freedom. Journal of Theoretical Politics. Bd. 15, H. 4, S. 387–403.
- PETTIT, P. (2007): Responsibility Incorporated. Ethics. Bd. 117, H. 2, S. 171–201.
- PFÜTZNER, C. (2018): Natürlich gärtnern mit Terra Preta: Praxiswissen für Garten, Hochbeet und Balkon. München. Oekom Verlag.
- PINEAULT, É. (2016): Growth and Over-accumulation in Advanced Capitalism: Some Critical Reflections on the Political Economy and Ecological Economics of Degrowth. DFG-Kollegforscher_innengruppe Postwachstumsgesellschaften (5).
http://www.kolleg-postwachstum.de/sozgwmedia/dokumente/WorkingPaper/wp5_2016+Pineault.pdf.
- POORE, J.; NEMECEK, T. (2018): Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers. Science, Bd. 360, S. 987–992.

POPP, A.; LOTZE-CAMPEN, H.; BODIRSKY, B. (2010): Food consumption, diet shifts and associated non-CO₂ greenhouse gases from agricultural production. *Global Environmental Change, Governance, Complexity and Resilience*. Bd. 20, H. 3, S. 451–462.

QUASCHNING, V. (2016): Sektorkopplung durch die Energiewende – Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. <https://www.volker-quaschnig.de/publis/studien/sektorkopplung/Sektorkopplungsstudie.pdf>.

RAM, M.; BOGDANOV, D.; AGHAHOSSEINI, A.; OYEWO, S.; GULAGI, A.; CHILD, M.; BREYER, C. (2017): Global Energy System Based on 100% Renewable Energy – Power Sector. Lappeenranta University of Technology, Energy Watch Group. <http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/2017/11/Full-Study-100-Renewable-Energy-Worldwide-Power-Sector.pdf>.

REICHENBERG, L.; HEDENUS, F.; ODENBERGER, M.; JOHNSON, F. (2018): The marginal system LCOE of variable renewables – Evaluating high penetration levels of wind and solar in Europe. *Energy*. Bd. 152, S. 914–924.

REPENNING, J.; MATTHES, F. C.; EICHHAMMER, W.; BRAUNGARDT, S.; ATHMANN, U.; ZIESING, H.-J. (2015): Klimaschutzszenario 2050. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI. <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>.

RHODES, C. (2015): COP21 and „4 per thousand“ – Storing Carbon in the Soil. *Resilience*. <http://www.resilience.org/stories/2015-12-17/cop21-and-4-per-thousand-storing-carbon-in-the-soil/>.

ROGELJ, J.; LUDERER, G.; PIETZCKER, R. C.; KRIEGLER, E.; SCHAEFFER, M.; KREY, V.; RIAHI, K. (2015): Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C. *Nature Climate Change*, Bd. 5, S. 519–527.

SACHS, W. (1999): *Planet dialectics: explorations in environment and development*. Halifax, N.S., Johannesburg, London, New York. Fernwood Publishing.

SACHS, W. (2006): Is small still beautiful? E. F. Schumacher im Zeitalter der grenzenlosen Mega-Ökonomie. *Politische Ökologie*. Bd. 24, H. 100, S. 24–26.

SAMADI, S.; GRÖNE, M.-C.; SCHNEIDEWIND, U.; LUHMANN, H.-J.; VENJAKOB, J.; BEST, B. (2017): Sufficiency in energy scenario studies: Taking the potential benefits of lifestyle changes into account. *Technological Forecasting and Social Change*, Bd. 124, S. 126–134.

SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G. J. (2017): Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Bd. 14, H. 36, S. 9575–9580.

SAVORY, A. (2013): Response to request for information on the “science” and “methodology” underpinning Holistic Management and holistic planned grazing. Savory Institute. <http://www.savoryinstitute.com>.

SCARBOROUGH, P.; APPLEBY, P. N.; MIZDRAK, A.; BRIGGS, A. D. M.; TRAVIS, R. C.; BRADBURY, K. E.; KEY, T. J. (2014): Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK. *Climatic Change*. Bd. 125, H. 2, S. 179–192.

SCHAUB, M. (2012): Spatial distribution of wind turbines is crucial for the survival of red kite populations. *Biological Conservation*. Bd. 155, S. 111–118.

SCHLATZER, M. (2013): Ernährungsgewohnheiten und ihre Auswirkungen auf die Ernährungssicherung künftiger Generationen. *Journal für Generationengerechtigkeit*. Bd. 13, H. 1, S. 17–23.

SCHMIDT-BLEEK, F. (1994): Wieviel Umwelt braucht der Mensch?: MIPS - Das Maß für ökologisches Wirtschaften. Springer Basel AG.

SCHMIDT-BLEEK, F. (2008): Factor 10: The future of stuff. *Sustainability: Science, Practice, & Policy*. Bd. 4, H. 1.

SCHMITZ, F. (2014): Tierethik, Grundlagentexte. Berlin. Suhrkamp Verlag.

SCHNEIDEWIND, U.; ZAHRNT, A. (2013): Damit gutes Leben einfacher wird: Perspektiven einer Suffizienzpolitik. München. Oekom-Verlag.

SCHNEIDEWIND, U.; ZAHRNT, A. (2014): The institutional framework for a sufficiency driven economy. *Ökologisches Wirtschaften*. Bd. 29, S. 30–33.

SCHOLZ, M. (Hrsg.) (2012): Ökosystemfunktionen von Flussauen: Analyse und Bewertung von Hochwasserretention, Nährstoffrückhalt, Kohlenstoffvorrat, Treibhausgasemissionen und Habitatfunktion: Ergebnisse des F+E-Vorhabens (FKZ 3508 850 100). Bonn-Bad Godesberg. Bundesamt für Naturschutz.

SCHUMACHER, E. F. (1973): Small Is Beautiful. <http://www.ditext.com/schumacher/small/small.html>.

SCHUSTER, E.; BULLING, L.; KÖPPEL, J. (2015): Consolidating the State of Knowledge: A Synoptical Review of Wind Energy’s Wildlife Effects. *Environmental Management*, Bd. 56, S. 300–331.

SEITZINGER, S. P.; PHILLIPS, L. (2017): Nitrogen stewardship in the Anthropocene. *Science*, Bd. 357, S. 350–351.

SHERWOOD, S.; UPHOFF, N. (2000): Soil health: research, practice and policy for a more regenerative agriculture. *Applied Soil Ecology*, Special issue: Managing the Biotic component of Soil Quality, Bd. 15, H. 1, S. 85–97.

SINHA, E.; MICHALAK, A. M.; BALAJI, V. (2017): Eutrophication will increase during the 21st century as a result of precipitation changes. *Science*. Bd. 357, S. 405–408.

SMITH, P. ET AL. (2014): Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, et al. (Hrsg.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Cambridge University Press.

SOBOTA, D. J.; COMPTON, J. E.; MCCRACKIN, M. L.; SINGH, S. (2015): Cost of reactive nitrogen release from human activities to the environment in the United States. *Environmental Research Letters*, Bd. 10, H. 2.

SOMMER, B.; WELZER, H. (2014): Transformationsdesign: Wege in eine zukunftsfähige Moderne. Transformationen. München. Oekom Verlag.

SORRELL, S. (2010): Energy, Economic Growth and Environmental Sustainability: Five Propositions. *Sustainability*, Bd. 2, H. 6, S. 1784–1809.

SPRINGMANN, M.; GODFRAY, H. C. J.; RAYNER, M.; SCARBOROUGH, P. (2016): Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change. *PNAS*, Bd. 113, H. 15, S. 4146–4151.

SRU (2011): Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten des SRU.
https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/o2_Sondergutachten/2011_07_SG_Wege_zur_100_Prozent_erneuerbaren_Stromversorgung.pdf?__blob=publicationFile.

STATISTISCHES BUNDESAMT (2018a): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen – Inlandsproduktberechnung, Lange Reihen ab 1970.
https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/Inlandsprodukt/InlandsproduktsberechnungLangeReihenPDF_2180150.pdf?__blob=publicationFile.

STATISTISCHES BUNDESAMT (2018b): Wirtschaftsbereiche - Wald und Holz.
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFische-rei/WaldundHolz/WaldundHolz.html;jsessionid=E3976ABC969AFBFF8A553DE788DFD7CD.cae4>.

STATISTISCHES BUNDESAMT (2018c): Wirtschaftsbereiche - Landwirtschaftliche Betriebe.

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFische-rei/LandwirtschaftlicheBetriebe/Tabellen/LandwirtschaftlicheBetriebeFlaechenHauptnutzungsarten.html;jsessionid=D11C3EF3518964688FF3FEA665976944.InternetLive1>.

STEFFEN, W. ET AL. (2018): Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. PNAS. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>.

STOIAN, D.; HENKEMANS, A. B. (2000): Between Extractivism and Peasant Agriculture: Differentiation of Rural Settlements in the Bolivian Amazon. International Tree Crops Journal. Bd. 10, H. 4, S. 299–319.

THEMA, J.; SUERKEMPER, F.; THOMAS, F.; ÜRGE-VORSATZ, D.; TEUBLER, J.; COUDER, J.; CHATTERJEE, S.; BOUZAROVSKI, S.; MZAVANADZE, N.; VON BELOW, D. (2017): More than energy savings: quantifying the multiple impacts of energy efficiency in Europe. Eceee Summer Study 2017 proceedings. S. 1727-1736.

THOMAS, S. (2012): Energieeffizienz spart wirklich Energie – Erkenntnisse zum Thema „Rebound-Effekte“. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Bd. 62, H. 8, S. 8-11.

THOMAS, S.; THEMA, J.; KOPATZ, M. (2017): Ansätze für eine Energiesuffizienzpolitik. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Bd. 67, H. 7, S. 59-62.

THORNTON, P. K. (2012): Recalibrating Food Production in the Developing World: Global Warming Will Change More Than Just the Climate. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/24696>.

TOLLEFSON, J. (2017): The wooden skyscrapers that could help to cool the planet. Nature, Bd. 545, H. 7654, S. 280–282.

TOM, M. S.; FISCHBECK, P. S.; HENDRICKSON, C. T. (2016): Energy use, blue water footprint, and greenhouse gas emissions for current food consumption patterns and dietary recommendations in the US. Environment Systems and Decisions, Bd. 36, H. 1, S. 92–103.

TREUER, T. L. H. ET AL. (2017): Low-cost agricultural waste accelerates tropical forest regeneration. Restoration Ecology, doi: 10.1111/rec.12565.

UBA (2010a): Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel_2050.pdf.

UBA (2010b): CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland – Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale – Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3773.pdf>.

UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/o7_2014_climate_change_dt.pdf.

UBA (2016): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/texte_56_2016_klimaschutzbeitrag_des_verkehrs_2050_getagged.pdf.

UBA (2017): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_fachbrosch_rtd_final_bf_o.pdf.

UBA (2018): Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2017_12_18_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v1.0.xlsx.

ULLUM, K. (2017): Untersuchungen zur Wirkung von Biokohlekomposten in Topf- und Feldversuchen mit ausgewählten Pflanzen aus unterschiedlichen Klimazonen. Dissertation. Freie Universität Berlin.

URBAN, M. C. (2015): Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, Bd. 348, S. 571-573.

VAN SLUISVELD, M. A. E.; MARTÍNEZ, S. H.; DAI OGLOU, V.; VAN VUUREN, D. P. (2016): Exploring the implications of lifestyle change in 2°C mitigation scenarios using the IMAGE integrated assessment model. *Technological Forecasting and Social Change*. Bd. 102, S. 309–319.

VARTIAINEN, E.; MASSON, G.; BREYER, C. (2015): PV LCOE in Europe 2015-2050. *Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, September 14 - 18, 2015, Hamburg.

VERBRAUCHERZENTRALE RHEINLAND-PFALZ (2014): Wärmedämmung – spricht was dagegen? Antworten auf die zehn häufigsten Fragen zur Wärmedämmung,

https://www.sto.de/media/documents/produkte_1/wdvs_fakten_1/Antworten_auf_die_zehn_haeufigsten_Fragen_zur_Waermedaemmung_Stand_09-2014.pdf.

VERMEULEN, S. J.; CAMPBELL, B. M.; INGRAM, J. S. I. (2012): Climate Change and Food Systems. *Annual Review of Environment and Resources* Bd. 37, H. 1, S. 195–222.

VETTER, A.; BEST, B. (2015): Konvivialität und Degrowth. Zur Rolle von Technologie in der Gesellschaft. In: F. Adloff und V. M. Heins (Hrsg.), *Konvivialismus. Eine Debatte*. transcript Verlag.

VIEBAHN, P.; SOUKUP, O.; SAMADI, S.; TEUBLER, J.; WIESEN, K.; RITTHOFF, M. (2015): Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Bd. 49, S. 655-671.

VOIGT, C. C.; LINN, S. L.; PETERSONS, G. (2015): Wildlife and renewable energy: German politics cross migratory bats. *European Journal of Wildlife Research*.

VON WINTERFELD, U. (2011): So wollen wir leben! Erzählte Szenarien und ein Leitbild. Dokumentation der Zukunftswerkshops. dynaklim-Publikation.

VON WINTERFELD, U. (2017): Politische Stachel der Suffizienz. In: F. Adler und U. Schachtschneider (Hrsg.), *Postwachstumspolitiken: Wege zur wachstumsunabhängigen Gesellschaft*. München. Oekom-Verlag.

WALSTON JR., L. J.; ROLLINS, K. E.; LAGORY, K. E.; SMITH, K. P.; MEYERS, S. A. (2016): A preliminary assessment of avian mortality at utility-scale solar energy facilities in the United States. *Renewable Energy*. Bd. 92, S. 405-414.

WALTER, A.; WIEHE, J.; SCHLÖMER, G.; HASHEMIFARZAD, A.; WENZEL, T.; ALBERT, I.; HOFMANN, L.; ZUM HINGST, J.; VON HAAREN, C. (2018): Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050, BfN-Skripten 501, <https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript501.pdf>.

WBGU (Hrsg.) (1995): *World in Transition: The Threat to Soils*. Annual report. Bonn. Economica-Verlag.

WBGU (Hrsg.) (2009): *Welt im Wandel: zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung*. Berlin.

WEYLAND, M.; STEUWER, S. D. (2018): Germany's Struggle for Energy Efficiency: Policy Instruments after the National Action Plan for Energy Efficiency (NAPE). *GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society*, Bd. 27, H. 2, S. 216-221.

WIENS, J. J. (2016): Climate-Related Local Extinctions Are Already Widespread among Plant and Animal Species. *PLoS Biology*, Bd. 14, H. 12.

WIESEN, K.; TEUBLER, J.; SAURAT, M.; SUSKI, P.; SAMADI, S.; KIEFER, S.; SOUKUP, O. (2017): Analyse des Rohstoffaufwandes der Energieinfrastruktur in Deutschland. Sachverständigengutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes.

WIRTH, H. (2018): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>.

- WIRZ, A.; KASPERCZYK, N.; THOMAS, F. (2017): Kursbuch Agrarwende 2050 – ökologisierte Landwirtschaft in Deutschland – Langfassung. Greenpeace; Forschungsinstitut für biologischen Landbau.
https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/20170105_studie_agrarwende2050_lf.pdf.
- WÜSTEMANN, H. ET AL. (2017): Synergies and trade-offs between nature conservation and climate policy: Insights from the “Natural Capital Germany – TEEB DE” study. Ecosystem Services, Bd. 24, S. 187–199.
- ZERRAHN, A. (2017): Wind Power and Externalities. Ecological Economics. Bd. 141, S. 245-260.

6 Anhang

Anhang A – Anzahl zukünftiger Windenergieanlagen

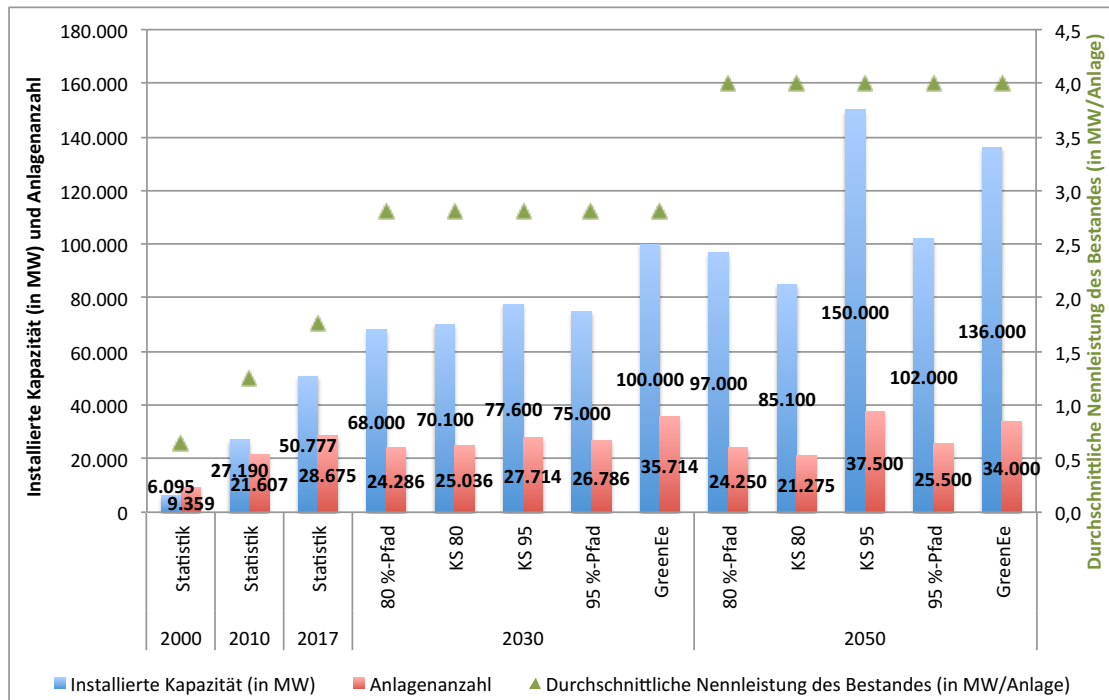


Abbildung A1: Installierte Kapazität (in MW) und Anlagenzahl von Onshore-Windenergieanlagen nach Szenarien bei einer angenommenen durchschnittlichen Nennleistung von 2,8 MW/Anlage im Jahr 2030 und 4 MW/Anlage im Jahr 2050

Quellen: Angegebene Szenarien sowie Bundesverband WindEnergie (2018) für die Statistik-Werte.

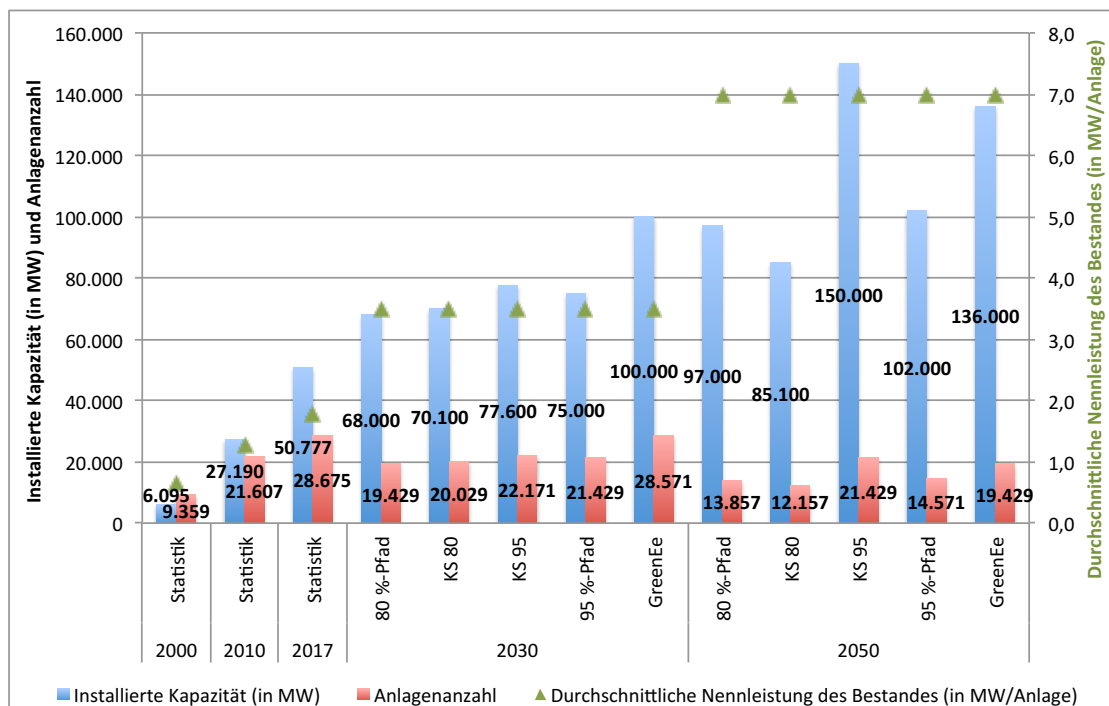


Abbildung A2: Installierte Kapazität (in MW) und Anlagenzahl von Onshore-Windenergieanlagen nach Szenarien bei einer angenommenen durchschnittlichen Nennleistung von 3,5 MW/Anlage im Jahr 2030 und 7 MW/Anlage im Jahr 2050

Quellen: Angegebene Szenarien sowie Bundesverband WindEnergie (2018) für die Statistik-Werte.

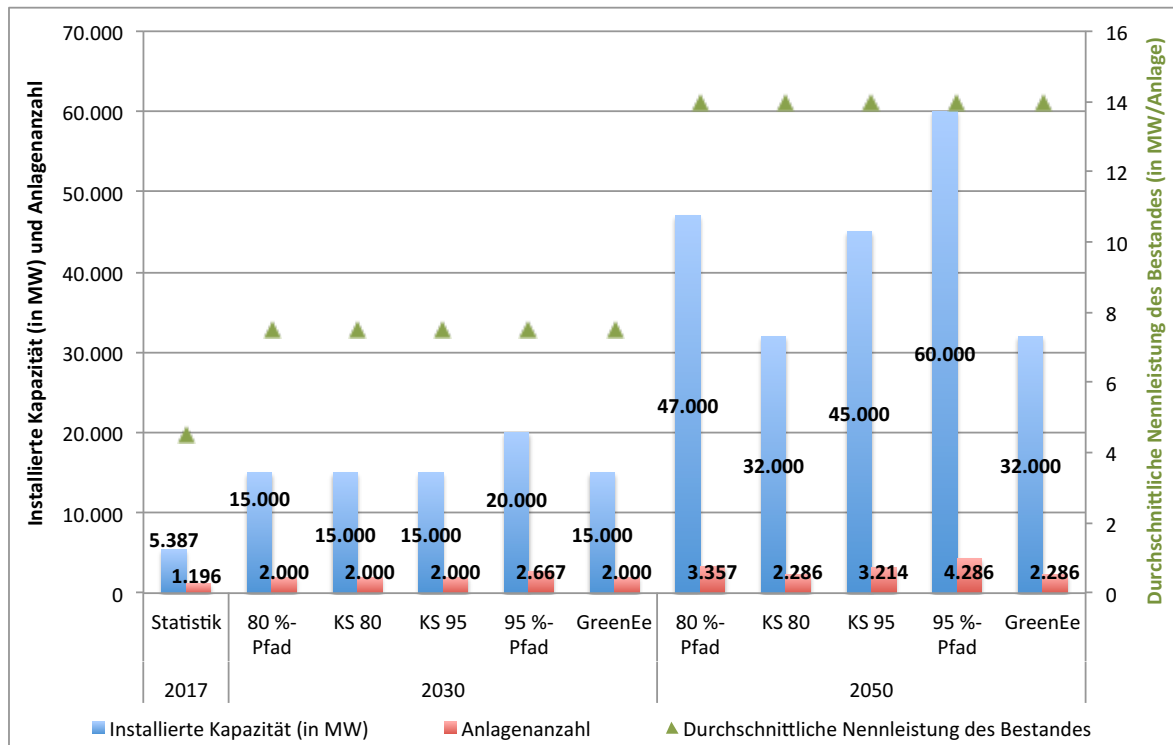


Abbildung A3: Installierte Kapazität (in MW) und Anlagenzahl von Offshore-Windenergieanlagen nach Szenarien bei einer angenommenen durchschnittlichen Nennleistung von 7,5 MW/Anlage im Jahr 2030 und 14 MW/Anlage im Jahr 2050

Quellen: Angegebene Szenarien sowie Bundesverband WindEnergie (2018) für die Statistik-Werte.

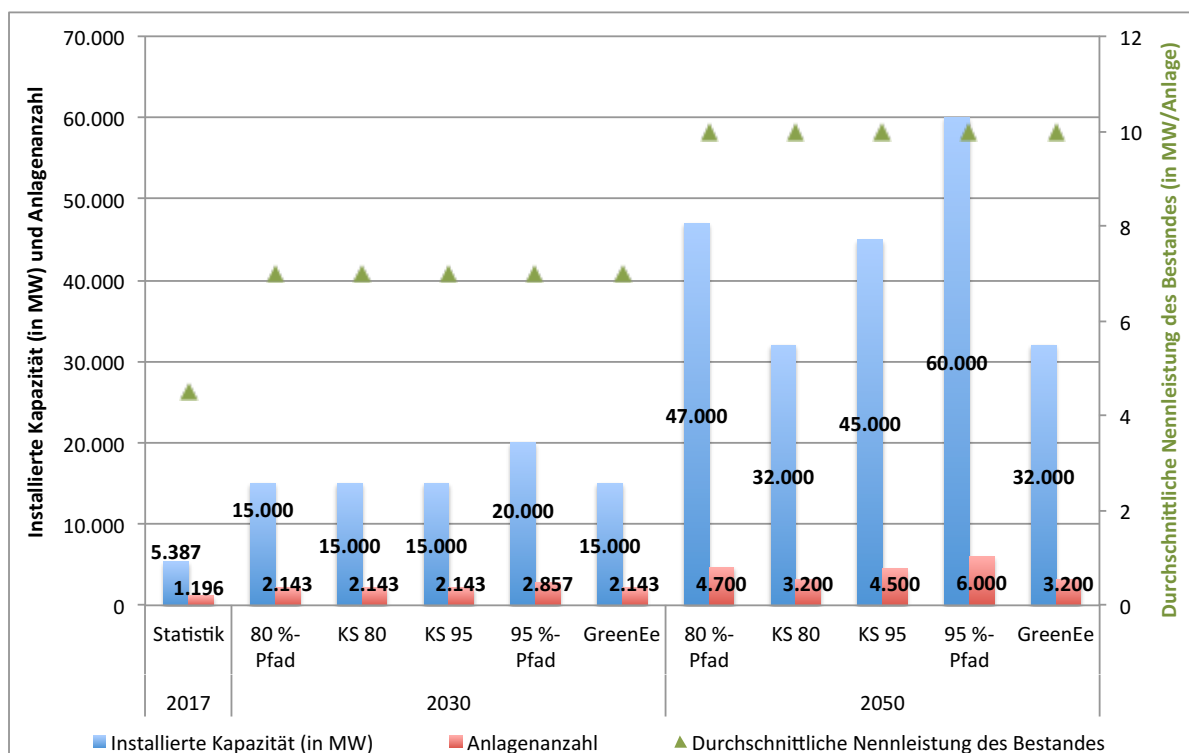


Abbildung A4: Installierte Kapazität (in MW) und Anlagenzahl von Offshore-Windenergieanlagen nach Szenarien bei einer angenommenen durchschnittlichen Nennleistung von 7,0 MW/Anlage im Jahr 2030 und 10 MW/Anlage im Jahr 2050

Quellen: Angegebene Szenarien sowie Bundesverband WindEnergie (2018) für die Statistik-Werte.

Anhang B – Verschiedene Biomassepotenziale

Das technisch-ökologische Nutzungspotenzial von Biomasse ist gering gegenüber anderen erneuerbaren Energien. So kommen Benndorf et al. (2014, S. 55) zu dem Schluss, *„dass biogene Ressourcen, auch Abfall und Reststoffströme, äußerst knappe Ressourcen darstellen. Ihre Zuordnung in bestimmte Verwendungspfade bedarf einer sorgfältigen Abwägung. Rein quantitativ können sie keinen substanziellen Beitrag zum Umbau der Energiesysteme in den Industrieländern mit deren hohen Energieverbräuchen leisten. Auf lokaler Ebene und in Nischenanwendungen sind jedoch durchaus kleine, aber sinnvolle Beiträge zur Energieversorgung denkbar“*

Es lassen sich dabei grob zwei Arten von Biomasse unterscheiden, wobei die auf den ersten Blick klaren Grenzen der beiden Kategorien hinsichtlich Art und Verfügbarkeit im Detail zuweilen weit weniger eindeutig sind.

- *Anbaubiomasse* wird speziell mit dem Ziel der stofflichen oder energetischen Verwertung angebaut. Sie ist zumeist kritisch zu sehen, da ihr Anbau in direkter Konkurrenz mit anderem Anbau, etwa für menschliche Nahrungsmittel steht, und folglich die Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln reduzieren bzw. deren Marktpreise erhöhen kann. Zusätzlich konkurriert der Biomasseanbau nicht nur mit dem Anbau von Futtermitteln (der aufgrund der hohen Nutztierbestände und der damit einhergehenden Folgen durchaus ebenfalls als kritisch anzusehen ist), sondern auch mit der möglichen Extensivierung oder Renaturierung der entsprechenden Flächen, die mit Vorteilen für den Naturschutz und – über das Potenzial natürlicher Treibhausgassenken – auch den Klimaschutz verbunden wäre. Die Nutzung von Anbaubiomasse kann je nach Ausgestaltung mit *negativen Umweltauswirkungen* einer intensiven Landwirtschaft einhergehen, wie z. B. einer Beeinträchtigung der Qualität von Wasser und Böden, einem steigenden Bedarf an Wasser und einer negativen Wirkung auf Biodiversität bzw. Naturschutz. Die energetische Nutzung von Anbaubiomasse ist – entgegen der vereinfachenden Annahmen in vielen Studien – *nicht treibhausgasneutral* und ihr Anbau kann mit Landnutzungsänderungen und Humusverlust einhergehen. Insofern ist das technisch-ökologische Potenzial von nachhaltiger Anbaubiomasse entweder nicht gegeben oder zumindest sehr gering (ÖI et al. 2004). *„Die energetische Nutzung von landwirtschaftlich erzeugten, nachwachsenden Rohstoffen ist demnach in weiten Teilen eine Brückentechnik, die unter den Szenariobedingungen bis zum Jahr 2050 ihre Bedeutung als Klimaschutzmaßnahme zum großen Teil verlieren wird.“* (Benndorf et al. 2014 S. 297)
- *Reststoff- oder Abfallbiomasse* dagegen besteht aus biogenen Rest- und Abfallstoffen und ihre Bilanz ist differenziert zu analysieren. Es handelt sich hierbei um prozessbedingt ohnehin anfallende landwirtschaftliche Reststoffe, Grünschnitt aus Landschafts- sowie Naturpfllegemaßnahmen, Siedlungsabfälle und Abfälle aus der Nahrungsmittel-verarbeitenden Industrie sowie Holzreststoffe. Umweltwirkungen entstehen primär dadurch, dass die Verwendung biogener Rest- und Abfallstoffe zur Energiegewinnung stets in Konkurrenz zu

anderen Nutzungspfaden steht – d.h. vor allem zum Verbleib dieser organischen Substanz im biologischen Kreislauf vor Ort. Die Entnahme von Schwachholz aus bewirtschafteten Wäldern etwa entzieht diesem Ökosystem Mineral- und Nährstoffe und vermindert die neuerliche Humusbildung im Wald, welche wiederum (unter anderem) eine dauerhaftere Sequestrierung von Kohlenstoff bewirkt. Daneben wäre auch eine stoffliche Verwendung der Reststoffe prinzipiell möglich, etwa für die Papier- oder Kunststoffindustrie, oder zur Erzeugung von Pflanzenkohle und wasserstoffhaltigem, energiereichem Gas. Die Nutzung derartiger Synergien kann die Bilanz der Biomassenutzung zumindest für Reststoffbiomasse merklich zum Positiven hin beeinflussen; ob dies auch für Teile der Anbaubiomasse gilt, ist derzeit allerdings unklar.

Das technisch-ökologische Potenzial von thermischer Energie aus Reststoffbiomasse beträgt in Deutschland ca. 725 PJ/a für das Jahr 2050, mit vergleichbaren Werten für den heutigen Stand (ÖI et al. 2004). Dabei machen Festbrennstoffe 583 PJ und Biogas 143 PJ aus. Vor allem das Potenzial der Biogaserzeugung ist dabei stark abhängig von der Größe der Tierbestände, die allerdings ihrerseits weitere Umwelt- und Klimaprobleme generieren.

Diese Werte werden als Grenze der energetischen Biomassenutzung vom Umweltbundesamt in seiner Studie *„Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“* (Benndorf et al. 2014) übernommen, liegen aber deutlich unter den entsprechenden Werten, die in den meisten der in Kapitel 2 betrachteten Szenarien angesetzt werden. Mit Ausnahme des UBA-Szenarios „GreenEe“ wird in diesen Szenarien auch eine energetische Nutzung von Anbaubiomasse angenommen, was zu einer jährlichen Biomasse-Verfügbarkeit von ca. 1.100 bis 1.300 PJ führt.

Unter der Annahme einer Ernährungswende²⁰ hin zu einer wesentlichen Reduktion von tierischen Produkten wie Fleisch, Eier und Milch und einem möglichen Bevölkerungsrückgang könnten Flächen²¹ frei werden, die zur Renaturierung und auch zur teilweisen Entnahme von Biomasse genutzt werden könnten. Das „Kursbuch Agrarwende 2050“ (Wirz et al. 2017) vom Forschungsinstitut für biologischen Landbau und Greenpeace skizziert entsprechende Szenarien. *„Bei einer großen Ernährungswende und 76 Millionen Einwohnern bleiben 1,28 Millionen Hektar Restfläche (0,89 Millionen Hektar bei 80 Millionen Einwohnern), die nicht zur Lebensmittelproduktion benötigt werden. Diese Fläche kann für die Produktion von Biomasse und/oder zum Export von Ackerfrüchten zur Verfügung stehen“* (Wirz et al. 2017 S. 63). Allerdings gelten für diese Flächen dieselben oben dargestellten Einschränkungen wie bei den bestehenden Flächen, d. h. die Renaturierung stellt auch hier zu-

²⁰ „Um Deutschland komplett mit Lebensmitteln aus ökologischer und ‚ökologisierter‘ Erzeugung versorgen zu können, muss im Durchschnitt etwa 50 Prozent weniger Fleisch verzehrt werden. Ein völliger Verzicht ist also nicht notwendig. Für die ‚große Ernährungswende‘ wurde für einen Teil der Bevölkerung sogar ein Fleischkonsum auf heutigem, hohem Niveau angenommen. Mit einer ‚Ernährung as usual‘, wie sie heute mit einem durchschnittlichen Fleischverzehr von etwa 60 Kilogramm praktiziert wird, werden wir das Ziel aber sicher verfehlen. Dem sinkenden Verzehr muss auch die Produktion folgen: Tierhaltung darf nicht mehr exportorientiert erfolgen.“ (Wirz et al. 2017 S. 6)

²¹ In Deutschland werden auf mehr als 60 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Fläche Futterpflanzen angebaut (Deutscher Bundestag 2007).

meist für die THG-Bilanz die beste Option dar (siehe Repenning et al. 2015 S. 367; Wüstemann et al. 2017).

Unter Berücksichtigung der Agrarwende hin zur ökologischen Landwirtschaft (Wirz et al. 2017) verändern sich die Rahmenbedingungen für Biomasse: *„Im Rahmen der angestrebten ökologisierten konventionellen Landwirtschaft besteht allerdings ein Potenzial, um organischen Abfall aus der Tierhaltung in Biogasanlagen energetisch zu nutzen. Hinzu kommt der Aufwuchs von Flächen, die aus Gründen des Biodiversitäts- und Klimaschutzes extensiv bewirtschaftet bzw. nur gepflegt werden (Moorflächen, Ökologische Vorrangflächen). Eine darüber hinaus gehende Erzeugung von Biomasse soll nur im Rahmen von vorhandenen „Restflächen“ erfolgen, die nicht für die Lebensmittelproduktion gebraucht werden“* (ebd. S. 47 eigene Hervorhebung).

Unter gewissen Bedingungen kann Biomasseanbau allerdings durchaus auch hinsichtlich der THG-Bilanz akzeptabel sein: So weisen Hartje et al. (2015) darauf hin, dass der Anbau erneuerbarer Energieträger auf wiedervernässten Moorböden (so genannte „Paludikultur“) sowohl hinsichtlich der jährlichen Flächenausbeute als auch hinsichtlich der THG-Emissionsbilanz von Vorteil sein kann. Das Gesamtpotenzial zur Biomasseerzeugung mittels dieser Praktiken ist allerdings aufgrund der begrenzten zur Verfügung stehenden (potenziellen) Feuchtflächen vergleichsweise gering. Wüstemann et al. (2017) weisen zudem auf Wildpflanzen-Mischanbau, Reststoffbiomasse-Fermentation und den potenziell weitgehend naturverträglich gestaltbaren Anbau von Kurzumtriebsplantagen als weitere zu untersuchende Ansätze hin.

Anhang C – Grundlegende Erläuterungen zur Suffizienz

Auch wenn es in der Literatur kein einheitliches Verständnis von Suffizienz oder damit verbundenen Maßnahmen gibt, kann man Effizienz als eine Strategie bezeichnen, *„die Dinge richtig zu machen“*, während Suffizienz *„die richtigen Dinge zu tun“* bedeutet (Sachs 1999). Es handelt sich um *„Änderungen von Konsummustern, die helfen, innerhalb der ökologischen Tragfähigkeit der Erde zu bleiben, wobei sich Nutzenaspekte des Konsums ändern“* (Fischer et al. 2013 S. 10). Allerdings ist es eine vereinfachte Sichtweise, Suffizienz als „Verhaltensänderung“ den vermeintlich rein „technischen“ Strategien der Effizienz und Konsistenz gegenüberzustellen, da viele Maßnahmen, die meist als Effizienz- oder Konsistenzbeiträge gelten, ebenfalls ein mit dem Ansatz konformes Verhalten erfordern – sei es das Voll-Befüllen einer Waschmaschine oder die Verwendung von programmierbaren Heizungsthermostaten.

Fischer et al. (2013) weisen ferner darauf hin, dass Suffizienz nicht nur als „letztes Mittel“ für Situationen angesehen werden darf, wo Effizienz- und Konsistenzstrategien versagen. Sie könne stattdessen in verschiedenen Fällen „auch die kostengünstigere, weniger konfliktträchtige, ja, die elegantere Lösung darstellen“ (ebd. S. 5). Maßnahmen zur Beförderung von Effizienz oder Konsistenz sind zumeist mit (z. T. erheblichen) Kosten verbunden, etwa hinsichtlich der notwendigen Investitionen – wie dies u. a. in der Diskussion um die Kosten der „Energiewende“ erkennbar ist. Auch können umfangreiche und umstrittene Infrastrukturmaßnahmen erforderlich sein, wie etwa der Ausbau von Überland-Stromleitungen. Maßnahmen wie eine Sanierungspflicht für Altbauten stellen wiederum starke politischer Eingriffe dar.

Hinsichtlich der Suffizienz-Strategie lassen sich *bottom-up* und *top-down*-Ansätze unterscheiden, die teilweise ergänzend, teilweise aber auch im Spannungsverhältnis zueinander stehen. Während *bottom-up*-Ansätze sich auf das Handeln einzelner Individuen bzw. gesellschaftlicher Gruppen und eine anschließende Diffusion in den Mainstream konzentrieren, halten *top-down*-Ansätze das Erreichen von Suffizienz nur über weitreichende Strukturreformen für möglich, wie z. B. durch die Schaffung fahrrad- und fußgängerfreundlicher (und etwas „autounfreundlicherer“) Städte mit kurzen Wegen oder durch Hersteller-Rücknahmeverpflichtungen für Alltagsgegenstände, um deren Lebensdauer, Reparatur- und Recyclingfähigkeit zu erhöhen. Zu beachten gerade in Hinblick auf *top-down*-Ansätze ist allerdings, dass soziokultureller Wandel sich nicht oder nur schwer normativ verordnen lässt, und daher Suffizienz auch nicht oder kaum repressiv durchgesetzt werden kann (von Winterfeld 2011); entsprechend müssen *top-down* Ansätze eher durch geeignete Anreizsetzungen, die passende Schaffung von formellen Institutionen oder „Nudging“ gestaltet werden. Die hier diskutierten Ansätze nutzen allesamt diese Strategien.

Direkte Rebound-Effekte oder gar Backfire-Effekte (so große Rebound-Effekte, dass sich der Gesamtbedarf an Energie oder einer Ressource effektiv erhöht) sind bei Suffizienz- weniger wahrscheinlich als bei Effizienzmaßnahmen (Lage 2017), jedoch auch hier grundsätzlich möglich. So können Ressourcen wie Zeit oder Geld auch durch suffizientes Verhalten in einem Bereich frei werden und anschließend in einem anderen Bereich investiert werden bzw. das suffiziente Verhalten von Teilen der Ge-

sellschaft könnte zu konsumförderndem Preisverfall führen (dies wäre ein indirekter bzw. makroökonomischer Rebound-Effekt). Zu vermuten ist, dass solche Effekte wahrscheinlicher werden, je mehr die geänderten Handlungsweisen aus einer intrinsischen Motivation des bzw. der Einzelnen heraus erfolgen, und nicht allein durch suffizienzfördernde Strukturen (z. B. Tempolimits) angeregt bzw. verordnet werden.

Wolfgang Sachs (1999) betont die Notwendigkeit, Effizienz- und Suffizienzstrategien zu kombinieren. Wie Vetter und Best (2015) betonen, können selbst für Hoffnungsträger wie Elektromobilität und erneuerbare Energien Auswüchse entstehen, wenn die ökologische Verantwortung allein den Technologien übertragen wird, während die Logik von Wachstum und Steigerung unangetastet bleibt. Technologische Lösungen stehen oft für kontinuierliche industrielle Moderne und Techno-Optimismus unter anderen Bedingungen: Dies kann in einem verstärkten Aufkommen von Hybrid-Geländewagen, Vorstadt-Einfamilienhäuser mit PV- und Solarthermieanlagen und dem Besitz einer Vielzahl von (energieeffizienten) elektronischen Geräten führen - statt nachhaltiger Kultur, "*Konvivialität*" (Illich 1973) und "*Small is beautiful*" (Schumacher 1973; Sachs 2006).

Wichtige Begriffe für Suffizienz sind "*Produktsubstitution*" und "*Dematerialisierung*", definiert von Goedkoop et al. (1999 S. 18) als "eine produktsubstituierende Dienstleistung ist eine Dienstleistung, welche eine derartige Bedürfnisbefriedigung ermöglicht, dass sie eine signifikante Abnahme der für ihre Erfüllung benötigten Materialkomponente mit sich bringt" und "Dematerialisierung verändert die Bedürfnisbefriedigung eines Nutzers so, dass die Materialflüsse und der Energiefluss dieser Bedürfnisbefriedigung deutlich abnehmen".

Sehr oft wünschen sich die Verbraucher nicht unbedingt ein bestimmtes Materialprodukt, sondern den Service, den es bietet. Die materielle Auswirkung pro Einheit Service (MIPS) kann oft drastisch reduziert werden, indem man die geforderte Leistung identifiziert und einen geeigneten Weg findet, sie zu anzubieten (Schmidt-Bleek 1994, 2008). Beispiele hierfür sind die Substitution transozeanischer Postbriefe per E-Mail, Telefonkonferenzen statt physischer Geschäftstreffen (sofern der Schwerpunkt auf technischen Fragen liegt) oder die Bereitstellung von Proteinen in der menschlichen Ernährung aus synthetisiertem Fleisch oder pflanzlichen Quellen anstelle von Zuchtrindern.

Von Winterfeld (2017) hebt auch die politische Dimension einer prägnanten Suffizienzstrategie und das "Recht, nicht immer mehr wollen zu müssen" hervor, das mit der Entmaterialisierung oder, direkter, mit der Ablehnung einer weiteren Materialisierung verbunden ist. Auf diese Weise könnte letztlich auch Druck auf die Unternehmen ausgeübt werden, ihre Produktionsprozesse anzupassen, um sowohl auf eine veränderte, reduzierte und umweltfreundlichere Nachfrage als auch auf den zunehmenden sozialen und politischen Druck zu reagieren und möglichst geringe ökologische Schäden zu verursachen - selbst auf Kosten kleinerer Gewinnspannen und reduzierter Produktionsmengen.

Neben den diskutierten Suffizienzmaßnahmen bestehen weitere, bislang weniger quantitativ abgeschätzte Maßnahmen. Hervorzuheben ist hier die *Arbeitszeitreduktion* (Binswanger 2006; Paech 2016), welche eine Konsumreduktion durch mehr „Selbermachen“ und ein geringeres Bedürfnis an kompensierendem „Coping“-

Verhalten durch „Shopping“ ermöglichen kann. Je nach betrachteter sozioökonomischer Gruppe kann eine Arbeitszeitreduktion allerdings auch zu einem erhöhten Energiebedarf im Bereich von Freizeitaktivitäten führen, der zu erwartende Netto-Effekt wird demzufolge kontrovers diskutiert (Buhl 2016).

Arbeitszeitreduktion kann jedoch auch förderlich sein für einen weiteren, eng mit der Suffizienz verbundenen Bereich: *Eigeninitiativen* und gesellschaftliches Engagement können *Produktionsprozesse* ganz unmittelbar *beeinflussen*. In diesem Bereich sind Prosumenten zu nennen, wie sie im Bereich der dezentralen Energiebereitstellung (z. B. über private Fotovoltaik-Anlagen auf Wohngebäuden) und der Solidarischen Landwirtschaft oder der partiellen Selbstversorgung zu finden sind. Auch ist die nicht-kommerzielle Spielart des *Teilens und gemeinsamen Nutzens* (nicht zu verwechseln mit einer Sharing-Economy im Sinne von Airbnb oder Uber) durch z. B. Stadtteilwerkstätten und Repair-Cafés zu nennen. All diesen Bereichen ist gemein, dass es sich um partizipative Ansätze des gesellschaftlichen und letztlich auch politischen Engagements handelt, die transformatives Potenzial besitzen.

Anhang D – Abschätzung des THG-Minderungspotenzials durch Pflanzenkohle

Das jährliche technische Gesamtpotenzial wird hier grob auf 28 Mt Pflanzenkohle (50 Mt bei Nutzung des ansonsten in der Tierhaltung anfallenden Teils der Reststoffbiomasse durch entsprechende Priorisierung), und entsprechend²² einer Einspeicherung von bis zu 100 Mt CO₂/Jahr (180 Mt bei Priorisierung)²³ geschätzt (basierend auf ÖI et al. 2004). was Hierbei wurde der Großteil der in der land- und forstwirtschaftlichen Produktion anfallenden pflanzlichen Reststoffbiomasse als Quelle angenommen; der Abschätzung liegend folgende Angaben zugrunde:

- Schwach- und Restholz (ÖI et al. 2004 S. 110 ff.)
 - jährlich anfallende Menge:
8,4-12,8 Mt (2000) bzw. 9-13 Mt (2030)
 - aktuelles Holz-Kohlepotenzial: ca. 4-6 Mt
- Stroh (ebd. S. 82 ff.)
 - Bei einem Verhältnis von Korn : Stroh von ca. 1-1,5 : 1 anfallende Menge:
36 Mt (2000) bzw. 27-33 Mt (2030);
 - davon verfügbar aufgrund der konkurrierenden Verwendung in der Tierhaltung:
4,2-7,9 Mt (2000) bzw. 3,7- 5 Mt (2030);
 - aktuelles Stroh-Kohlepotenzial: ca. 2-3 Mt
- Zuckerrüben (Blätter) (ebd. S.93 f)
 - 4,5 t/ha organische Trockenmasse (oTS),
(Gasertrag in Biogasanlagen ~0,5 m³/kg oTS);
 - Anbau auf 450.000 ha erbringt 28 Mt Zuckerrüben (2004);
bei 50%-Nutzung des Blattwerks (in Konkurrenz zu Futtersilage)
ca. 2,5 Mt oTS, 1,2 Mt Kohle, ggf. 1,2 Mio. m³ Gas;
- Kartoffelkraut (S.93 f)
 - 1,73 t/ha oTS, Gasertrag ~0,9 m³/kg oTS
 - Anbau auf 280.000 ha, 13 Mt Kartoffeln (2004)
 - bei 50%-Nutzung (Ernteverlust) ca. 0,5 Mt oTS, resultierend in
0,25 Mt Kohle, ggf. 0,4 Mio. m³ Gas
- die landwirtschaftliche Fläche in D betrug im Jahr 2017 ca. 16,7 Mio. ha, die forstwirtschaftlich genutzte Waldfläche inkl. Kurzumtriebsplantagen im Jahr 2016 betrug ca. 7,2 Mio. ha (Statistisches Bundesamt 2018b, 2018c)
- Pflanzenkohle aus der gesamten Landwirtschaft wird deswegen hier als ca. das 10-fache der von Kartoffeln und Zuckerrüben verfügbaren Mengen abgeschätzt, d. h. 15 Mt.

²² CO₂ besitzt die ca. 3,7-fache Masse pro Kohlenstoffatom wie Kohle (die nahezu ausschließlich aus Kohlenstoff besteht).

²³ Hiermit könnte die deutsche Landwirtschaft theoretisch in ihrer Gesamtheit eine ausgeglichene THG-Bilanz erreichen (aktueller THG-Ausstoß der Landwirtschaft innerhalb Deutschlands inkl. landwirtschaftlicher Landnutzungsänderungen: rund 103 Mt CO₂-Äquivalent (UBA 2018); deutscher Gesamt-THG-Ausstoß aller Sektoren: rund 900 Mt)

- Inklusive Stroh und Holz ergibt dies ca. 28 Mt Pflanzenkohle, was sich auf 40 Mt erhöhen würde, sofern die Kohleherstellung bei Stroh eine Priorisierung gegenüber der Nutzung in der Tierhaltung erfahren würde (begleitet von entsprechender Tierbestandsreduktion).

Anhang E - Erläuterungen zu den Bewertungen in Tabelle 13 im Fazit

	Naturverträglichkeit	Ressourcenschutz	Potenzielle Umsetzungsschwindigkeit	Gesellschaftliche Akzeptanz	Geringe Kosten	Unabhängigkeit vom Ausland
Stärkere Nutzung von Fotovoltaik anstatt von Windenergie	Geringere Vorteile bei Freiflächenanlagen, höhere bei Dachanlagen	Insgesamt ist der Ressourcenbedarf pro kWh bei PV etwas höher als bei Windenergie (Wiesen et al. 2017), dafür fällt allerdings bei PV-Anlagen kein Bedarf nach seltenen Erden an (Viebahn et al. 2015; Lieberei/Gheewala 2017)	PV-Anlagen können grundsätzlich sehr schnell ausgebaut werden; der notwendige Ausbau der Verteilnetze kann vermutlich schneller erfolgen als der bei forcierter Windenergieausbau stärker benötigte Übertragungsnetzausbau	Geringere Vorteile bei Freiflächenanlagen, höhere bei Dachanlagen; aber PV grundsätzlich deutlich höhere Akzeptanz als Windenergie (Agentur für Erneuerbare Energien 2018)	S. Text in Abschnitt 3.1; aktuellen Studien zufolge keine oder keine wesentlichen Mehrkosten durch stärkeren PV-Fokus (gegenüber Wind) erwartet	Ähnlich wie im Referenzfall (d. h. bei stärkerer Windenergienutzung) gewisse Abhängigkeit vom Ausland durch Notwendigkeit bzw. Vorteilhaftigkeit von Stromaustausch zur besseren Integration der fluktuierenden Erzeugung
Stärkere Nutzung anderer Erneuerbarer anstatt von Biomasse	Nutzung von Umweltwärme und Solarthermie dürfte – im Gegensatz zur Biomassenutzung – weitgehend unproblematisch für die Natur sein	Vermutlich höherer Bedarf an abiotischen Ressourcen, dafür natürlich deutlich weniger Bio-massebedarf	Andere erneuerbare grundsätzlich schnell ausbaubar, allerdings können substantielle Beiträge nur in Kombination mit (langsamem skalerbarer) weitgehender Gebäudesanierung erreicht werden	Tiefe Geothermie zwar mit gewissen Akzeptanzproblemen (wg. z. T. einhergehender Probleme wie Erdstöße), Nutzung von Umweltwärme und Solarthermie aber unproblematisch bezüglich Akzeptanz	Kostenvergleich stark abhängig von Randbedingungen (z. B. Neubau oder unsanierter Altbau); grundsätzlich keine bedeutenden Kostendifferenzen (Agentur für Erneuerbare Energien 2017)	Keine relevante Abhängigkeit vom Ausland

	Naturverträglichkeit	Ressourcenschutz	Potenzielle Umsetzungsschwwindigkeit	Gesellschaftliche Akzeptanz	Geringe Kosten	Unabhängigkeit vom Ausland
Deutliche Erhöhung der Energieeffizienz	Hohe Naturverträglichkeit, da i. d. R. weniger ressourcenintensiv und i. d. R. kein direkter Einfluss auf Ökosysteme	Einsparung fossiler Energieträger bzw. verminderte Notwendigkeit der Nutzung erneuerbarer Energieträger, allerdings auf der anderen Seite teilweise signifikanter Ressourcen-Mehrbedarf (z. B. Dämmmaterial und Batterien im Falle der effizienteren E-Autos)	Viele Effizienzpotenziale prinzipiell schnell erschließbar, allerdings gibt es in der Realität Restriktionen, die mit typischen Erneuerungszyklen zusammenhängen; bei der Gebäudesanierung zusätzlich (u. a. fachkräfteseitige) Grenzen der Beschleunigung	Grundsätzlich ist Effizienz unproblematisch, im wichtigen Bereich der Gebäude kann es aber v. a. aufgrund von hohem Investitionsbedarf, Änderungen am Gebäudebild sowie weiteren tatsächlichen oder vermeintlichen Problemen (z. B. Schimmelpilzbildung) zu Akzeptanzproblemen kommen	Hohe Spannweite, allerdings große Effizienzpotenziale mit „negativen“ oder sehr geringen Kosten (v. a. bei langfristiger Betrachtung aus gesellschaftlicher Perspektive)	Keine relevante Abhängigkeit vom Ausland
Verbreitung von suffizienteren Lebensstilen	I. d. R. keinerlei negative Einflüsse auf die Natur	I. d. R. nicht mit Ressourcenbedarf verbunden	Prinzipiell sehr kurzfristig Beiträge zur THG-Minderung möglich, allerdings erfordert eine breit gesellschaftlich wirkende Änderung von Lebensstilen vermutlich Zeit	Unproblematisch unter der Annahme, dass sich suffizientere Lebensstile „bottom-up“ durchsetzen; bei Vorgaben oder auch Vorschlägen aus Politik („top-down“) kann es zu gesellschaftlichen Abwehrreaktionen kommen	Keine (bedeuten den) monetären Kosten, allerdings „Opportunitätskosten“ für KonsumentInnen, sofern bestimmte Güter oder Dienstleistungen aufgrund von Vorgaben nicht mehr genutzt werden können	Keine relevante Abhängigkeit vom Ausland

	Naturverträglichkeit	Ressourcenschutz	Potenzielle Umsetzungsschwwindigkeit	Gesellschaftliche Akzeptanz	Geringe Kosten	Unabhängigkeit vom Ausland
Import von erneuerbar erzeugtem Strom	Forschungsbedarf vorhanden; vermutlich große Spannweite, je nach Lokalität und Art der Anlage(n); höhere VLS und prinzipiell großes Flächenpotenzial (mit Potenzial für Auswahl	Ähnlich wie für „Natur-verträglichkeit“; D. h. höhere VLS gegenüber höherem Ressourcen-aufwand durch höheren Infrastrukturbedarf	Ausbau der Infrastruktur benötigt Zeit, insbesondere sofern aus MENA-Region importiert werden soll; größere Importe aus dem europäischen Ausland bedürfen „nur“ inner-europäischem Netzausbau (inkl. Kuppelstellen)	Evtl. Probleme wegen teilweise auch in Deutschland benötigtem Infrastrukturmehrbedarf; Zweifel an Versorgungssicherheit und Ärger über „abfließende“ Wertschöpfung	Nach diversen Studien Kosten-senkungspotenziale gegenüber Erzeugung in Deutschland (aufgrund besserer natürlicher Bedingungen) (s. Abschnitt 3.5)	Hohe Abhängigkeit vom Ausland, sowohl was Umsetzung von Anlagen- und Infrastrukturausbau angeht, also auch was Zuverlässigkeit der Strom-lieferung betrifft
Import von auf Basis erneuerbarer Energien erzeugter synthetischer Energieträger	relativ unproblematischer Standorte) auf der einen Seite gegenüber Mehraufwand durch höheren Infrastrukturaufwand und evtl. geringeren Fokus auf Naturschutz in Drittländern auf der anderen Seite		Importstruktur bei synthetischen Energieträgern nicht unbedingt netzabhängig, daher flexibler (Verschiffung) als beim Import von Strom, dennoch müssen Anlagen im Ausland errichtet werden, Infrastruktur gebaut und zwischenstaatliche Übereinkünfte erzielt werden	Grundsätzlich ähnliche Bewertung wie beim Stromimport, möglicherweise allerdings höhere Akzeptanz, da die Gesellschaft Import von flüssigen und gasförmigen Energieträgern bereits „gewöhnt“ ist		Etwas geringere Abhängigkeit könnte hier zugewiesen werden, da es keine Notwendigkeit einer leistungsgebundenen Infrastruktur gibt und folglich die Abhängigkeit von einzelnen Lieferländern bzw. -regionen kleiner ist (relativ flexiblerer „Aus-tausch“ von Export-ländern möglich)

	Naturverträglichkeit	Ressourcenschutz	Potenzielle Umsetzungsschwwindigkeit	Gesellschaftliche Akzeptanz	Geringe Kosten	Unabhängigkeit vom Ausland
Einsatz von CCS im Industriesektor	Vermutlich positiv, da auf große Erneuerbaren-Kapazitäten verzichtet werden könnte; allerdings werden große Mengen fossiler Energieträger benötigt, deren Förderung, Transport und Nutzung mit negativen Einflüssen auf die Natur verbunden sind; hinzu kommt die Wirkung der CCS-Infrastruktur; daher Nettoeffekt nicht zweifelsfrei zu bestimmen	Vermutlich bezüglich des nicht-fossilen Ressourcenbedarfs Einsparungen gegenüber der alternativen Notwendigkeit sehr hoher Erneuerbaren-Erzeugung; allerdings auf der anderen Seite natürlich deutlich höherer Bedarf an fossilen Energieträgern; Vergleichbarkeit schwierig	Relativ lange Vorlaufzeit wegen Infrastrukturbedarf, Notwendigkeit der weiteren Technologieife bzw. Kostensenkung und möglichen Akzeptanz-Schwierigkeiten; vor 2030/2035 ist kaum mit neuemswerten THG-Minderungsbeiträgen durch CCS zu rechnen	CCS wird v. a. in Deutschland kritisch beurteilt, u. a. wegen Sorgen vor den benötigten CO ₂ -Pipelines und CO ₂ -Speichern, aber auch grundsätzliche Opposition gegen Verlängerung der Ära fossiler Energieträger; derzeit jedoch noch nicht klar, ob Akzeptanz für Einsatz im Industriesektor (im Gegensatz zum Stromsektor, in dem es klare Alternativen gibt) evtl. höher ist	Nach einigen aktuellen Absätzungen (u. a. Gerbert et al. 2018) wäre CCS-Einsatz in der Industrie i. d. R. günstiger als Einsatz neuer strombasierter Prozesse; wegen langer Frist (und ungewissen zukünftigen Kostententwicklungen) ist diese Einschätzung allerdings aus unserer Sicht mit hoher Unsicherheit behaftet	Da möglicherweise größere (und evtl. mit weniger Akzeptanzproblemen verbundene) Speicher in Nachbarländern genutzt würden, könnte es hier eine gewisse Abhängigkeit geben
Förderung natürlicher Senken	Häufig positive Synergieeffekte mit Naturschutz	Kein relevanter Ressourcenbedarf zu erwarten	Grundsätzlich i. d. R. schnell umsetzbar, aber Grenzen evtl. wegen Notwendigkeit des Flächenkaufs oder der Verbreitung der Praktiken u. a. in Landwirtschaft	I. d. R. keine größeren Akzeptanzprobleme zu befürchten, bei einigen Maßnahmen jedoch partiell denkbar (v. a. wegen des oft einhergehenden Flächenbedarfs)	Kosten komplex und stark abhängig von einzelnen Maßnahmen; schwierig, einen „typischen“ Wert zu beziffern	Keine relevante Abhängigkeit vom Ausland

	Naturverträglichkeit	Ressourcenschutz	Potenzielle Umsetzungsschwwindigkeit	Gesellschaftliche Akzeptanz	Geringe Kosten	Unabhängigkeit vom Ausland
Materialsstitution bzw. -effizienz und Kreislaufwirtschaft	Strategie reduziert i. d. R. Materialaufwand, teilweise (allerdings wohl nicht immer) auch Energieaufwand, daher sicherlich eher positive Effekte hinsichtlich Naturschutz zu erwarten	(Primärer) Materialbedarf wird (außer evtl. bei Materialsubstitution) vermindert	Einige Materialeffizienz-Potenziale schnell erschließbar, aber gerade bezüglich Kreislaufwirtschaft gilt: Weitere Forschung nötig, starker Wandel in Produktion und teilweise auf der Nutzerseite nötig, daher signifikante Beiträge zur THG-Minderung vermutlich nicht deutlich vor Mitte des Jahrhunderts zu erwarten	Grundsätzlich hohe gesellschaftliche Akzeptanz zu erwarten; seitens der für diese Strategie besonders relevanten Industrie könnte es allerdings (aufgrund von Strukturbrüchen bzw. Wachstums-minderung) zu starker Opposition kommen	Kosten unsicher, aus heutiger Sicht kaum seriös abschätzbar	Aufgrund der engen globalen Verflechtungen in der (Grundstoff-) Industrie, dürfte ein nationaler Alleingang kaum möglich sein